

**ANÁLISIS DEL APORTE CONTAMINANTE GENERADO POR EL
VERTIMIENTO TERMOMINERAL DEL HOTEL PANORAMA (PAIPA) SOBRE LA
FUENTE RECEPTORA RÍO CHICAMOCHA**

LINA MARÍA APONTE BETANCOURT

**UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE ESPECIALIZACIÓN EN RECURSOS HÍDRICOS
BOGOTÁ D.C.- NOVIEMBRE DE 2019**

**ANÁLISIS DEL APORTE CONTAMINANTE GENERADO POR EL
VERTIMIENTO TERMOMINERAL DEL HOTEL PANORAMA (PAIPA) SOBRE LA
FUENTE RECEPTORA RÍO CHICAMOCHA**

LINA MARÍA APONTE BETANCOURT

Trabajo de grado para obtener el título de especialista en Recursos Hídricos.

**ASESOR: DIEGO ALEJANDRO PULGARÍN
INGENIERO SANITARIO, M.SC.**

**UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE ESPECIALIZACIÓN EN RECURSOS HÍDRICOS
BOGOTÁ D.C.- NOVIEMBRE DE 2019**



Atribución-NoComercial-SinDerivadas 2.5 Colombia (CC BY-NC-ND 2.5)

La presente obra está bajo una licencia:

Atribución-NoComercial-SinDerivadas 2.5 Colombia (CC BY-NC-ND 2.5)

Para leer el texto completo de la licencia, visita:

<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/2.5/co/>

Usted es libre de:



Compartir - copiar, distribuir, ejecutar y comunicar públicamente la obra

Bajo las condiciones siguientes:



Atribución — Debe reconocer los créditos de la obra de la manera especificada por el autor o el licenciante (pero no de una manera que sugiera que tiene su apoyo o que apoyan el uso que hace de su obra).



No Comercial — No puede utilizar esta obra para fines comerciales.



Sin Obras Derivadas — No se puede alterar, transformar o generar una obra derivada a partir de esta obra.

Nota de aceptación

Presidente del Jurado

Jurado

Jurado

Bogotá D.C., diciembre de 2020

TABLA DE CONTENIDO

| | |
|--|----|
| INTRODUCCIÓN | 11 |
| 1. GENERALIDADES DEL TRABAJO DE GRADO | 12 |
| 1.1. Línea de Investigación | 12 |
| 1.2. Tipo de Investigación | 12 |
| 1.3. Planteamiento del Problema | 12 |
| 1.3.1. Antecedentes del problema | 12 |
| 1.3.2. Pregunta de investigación | 14 |
| 1.3.3. Variables del problema | 14 |
| 1.4. Justificación | 14 |
| 1.5. Hipótesis | 15 |
| 1.6. Objetivos | 15 |
| 1.6.1. Objetivo general | 15 |
| 1.6.2. Objetivos específicos | 15 |
| 2. MARCOS DE REFERENCIA | 16 |
| 2.1. Marco conceptual | 16 |
| 2.2. Marco teórico | 18 |
| 2.3. Marco jurídico | 22 |
| 2.1.1. Marco jurídico Nacional | 22 |
| 2.1.2. Marco jurídico Regional | 24 |
| 2.4. Marco geográfico | 25 |
| 2.5. Estado del arte | 26 |
| 3. METODOLOGÍA | 34 |
| 3.1. Investigación preliminar | 34 |
| 3.2. Formulación del modelo conceptual | 35 |
| 3.3. Selección del modelo | 35 |
| 3.4. Calibración y validación del modelo | 36 |
| 3.5. Análisis de sensibilidad e incertidumbre | 36 |
| 3.6. Formulación y simulación de escenarios | 36 |
| 3.7. Análisis de resultados | 37 |
| 4. LOCALIZACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO | 37 |
| 5. PROCESO DE INVESTIGACIÓN PRELIMINAR | 39 |
| 5.1. Búsqueda de información sobre la calidad de la fuente, un tributario y el | |

| | |
|--|----|
| vertimiento | 39 |
| 5.2. Información de estaciones hidrometeorológicas en la zona de estudio | 41 |
| 5.3. Identificación de usuarios del recurso hídrico en el tramo analizado | 45 |
| 5.4. Características de calidad del agua termomineral utilizada en el Hotel Panorama | 45 |
| 6. MODELO CONCEPTUAL | 48 |
| 7. MODELACIÓN DE CALIDAD DEL AGUA | 50 |
| 7.1. Determinación de la longitud de la zona de mezcla | 50 |
| 7.2. Segmentación de la corriente | 53 |
| 7.3. Datos de entrada al modelo | 54 |
| 8. CONCLUSIONES | 3 |
| 9. BIBLIOGRAFÍA | 4 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| FIGURA 1. CLASIFICACIÓN DE LAS AGUAS TERMO MINERALES..... | 19 |
| FIGURA 2. LOCALIZACIÓN GEOGRÁFICA DEL PROYECTO | 25 |
| FIGURA 3. ESQUEMATIZACIÓN DEL PROCESO DE CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN DEL MODELO | 36 |
| FIGURA 4. DELIMITACIÓN ACTUAL DE LA CUENCA ALTA DEL RÍO CHICAMOCHA..... | 38 |
| FIGURA 5. LOCALIZACIÓN RED HIDROGRÁFICA DEL ÁREA DE INFLUENCIA | 39 |
| FIGURA 6. VALORES TOTALES MENSUALES DE PRECIPITACIÓN (MMS) | 42 |
| FIGURA 7. VALORES MENSUALES DE TEMPERATURA (°C)..... | 42 |
| FIGURA 8. VALORES MEDIOS MENSUALES DE PUNTO DE ROCÍO (°C)..... | 42 |
| FIGURA 9. VALORES MEDIOS MENSUALES DE BRILLO SOLAR (HORAS) | 43 |
| FIGURA 10. VALORES MEDIOS MENSUALES DE NUBOSIDAD (OCTAS)..... | 43 |
| FIGURA 11. VALORES TOTALES MENSUALES DE VELOCIDAD DEL VIENTO (M/s) | 43 |
| FIGURA 12. VALORES MEDIOS MENSUALES DE EVAPORACIÓN (MMS)..... | 44 |
| FIGURA 13. DEFINICIÓN DE ZONA HORARIA DE LA REGIÓN EN LA CUAL SE REALIZA LA SIMULACIÓN | 44 |
| FIGURA 14. CANAL DE REBOSE DEL LAGO SOCHAGOTA ANTES DE ENTREGA AL RÍO CHICAMOCHA | 45 |
| FIGURA 15. CAPTACIÓN DE AGUA TERMOMINERAL “POZO AZUL”..... | 46 |
| FIGURA 16. DIRECCIONAMIENTO DE AGUA TERMAL USADA — PISCINAS FAMILIARES | 47 |
| FIGURA 17. MODELO CONCEPTUAL PARA LA SIMULACIÓN | 48 |
| FIGURA 18. ESQUEMA DE LA ZONA DE MEZCLA DE UN VERTIMIENTO A UN CUERPO DE AGUA LÓTICO..... | 50 |
| FIGURA 19. PERFIL DEL RÍO CHICAMOCHA EN LA ZONA DEL VERTIMIENTO | 52 |
| FIGURA 20. SEGMENTACIÓN DE LA CORRIENTE..... | 53 |
| FIGURA 21. DATOS DE INICIALES DE ENTRADA AL MODELO..... | 54 |
| FIGURA 22. HOJA HEADWATER..... | 54 |

LISTA DE TABLAS

| | Pág. |
|---|-------------|
| TABLA 1. COORDENADAS DEL PROYECTO | 26 |
| TABLA 2. PROCESO DE INVESTIGACIÓN PRELIMINAR PARA EL MODELO | 34 |
| TABLA 3. PROCESO DE FORMULACIÓN DEL MODELO CONCEPTUAL | 35 |
| TABLA 4. SELECCIÓN DE PARÁMETROS DE CALIDAD A ANALIZAR EN EL VERTIMIENTO Y EN LA FUENTE RECEPTORA | 39 |
| TABLA 5. RESULTADOS DE CALIDAD DE LAS VARIABLES A MODELAR | 41 |
| TABLA 6. COMPARATIVO CALIDAD DEL AGUA TERMOMINERAL ANTES Y DESPUÉS DE SU USO EN EL HOTEL PANORAMA | 48 |
| TABLA 7. ESCENARIOS DE MODELACIÓN DEL SISTEMA..... | 49 |
| TABLA 8. DATOS CÁLCULO ZONA DE MEZCLA RÍO CHICAMOCHA..... | 52 |
| TABLA 9. SEGMENTACIÓN DE LA CORRIENTE EN EL TRAMO ANALIZADO | 53 |
| TABLA 10. PARÁMETROS DE LUZ Y MODELOS DE TRANSFERENCIA DE CALOR SUPERFICIAL | 55 |
| TABLA 11. PARÁMETROS DE CLIMA UTILIZADOS PARA EL MODELO..... | 55 |
| TABLA 12. COMPARACIÓN RESULTADOS DEL MODELO | 3 |

INTRODUCCIÓN

El recurso hídrico termomineral aprovechado en el municipio de Paipa (Boyacá) para la potencialización del sector turístico como eje principal del crecimiento de su economía, se ha venido convirtiendo en una de las principales preocupaciones de la autoridad ambiental y de los usuarios que se benefician legal e ilegalmente del río Chicamocha para diversos usos.

Esto se debe a que los grandes caudales de vertimiento de agua termomineral generados por los principales hoteles y complejos turísticos, especialmente en épocas pico del año (fines de semana, festivos, vacaciones y feriados) no son gestionados de una manera válida para la autoridad ambiental. Así mismo, se suma el hecho de que las aguas termominerales naturalmente tienen niveles elevados en algunos parámetros como Temperatura ($^{\circ}\text{C}$), conductividad ($\mu\text{S}/\text{cm}$), Sulfatos (SO_4) y Cloruros (Cl^-) que exceden cualquier límite permisible para su descarga a fuente hídrica superficial.

Esta es una problemática compleja, considerando dos aspectos: 1) Normativamente no existen límites claros permisibles para los vertimientos de agua termomineral a fuente hídrica superficial y 2) Las aguas termominerales no son sometidas a ningún tipo de intervención química o física que altere sus características naturales, no interactúan mucho tiempo con el usuario (Para mantener la temperatura), ni son diluidas con otro tipo de vertimientos, por lo tanto las características naturales de las aguas son casi equivalentes a las características de su vertimiento.

El presente estudio pretende, a partir de un diagnóstico de la gestión actual del vertimiento generado por el Hotel Panorama (Paipa) y del análisis histórico de información secundaria proveniente de otros estudios realizados por el generador y por la autoridad ambiental, aplicar el modelo QUAL2K en la predicción de la influencia de este vertimiento sobre la fuente receptora actual Río Chicamocha, con el fin de efectuar un análisis comparativo de los resultados frente a lo establecido en la Resolución 631 de 2015 y los objetivos de calidad de la fuente receptora, así como determinar las eficiencias de remoción requeridas en un eventual sistema de tratamiento, para dar cumplimiento a los objetivos de calidad del Río Chicamocha.

1. GENERALIDADES DEL TRABAJO DE GRADO

1.1. LÍNEA DE INVESTIGACIÓN

Gestión y tecnología para la sustentabilidad de las comunidades.

1.2. TIPO DE INVESTIGACIÓN

El alcance y objetivos de la presente investigación la configuran como de tipo experimental y a su vez de tipo comparativo. Se considera de carácter experimental en el sentido de que su principal objetivo consiste en un análisis para predicción del comportamiento del vertimiento termal recreativo generado por el Hotel Panorama (Paipa) sobre la fuente receptora Río Chicamocha, utilizando información secundaria de campañas de monitoreo realizadas tanto por el generador como por la autoridad ambiental para la aplicación del modelo QUAL2K y la interpretación de sus resultados para el mejoramiento de la gestión que recibe actualmente el vertimiento.

Así mismo, se requieren análisis comparativos de los resultados del modelo, frente a la Resolución 631 de 2015 y la Resolución 3560 de 2015 de Corpoboyacá.

1.3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.3.1. Antecedentes del problema

El sector turístico del municipio de Paipa ocupa uno de los principales renglones de su economía local y regional gracias a importantes atractivos entre los que encuentran: Afloramientos de aguas termominerales con propiedades medicinales, el Lago Sochagota y el monumento a los Lanceros del Pantano de Vargas. Esto ha potencializado el mercado hotelero, incentivando a instituciones como la Caja de Compensación Familiar de Boyacá, COMFABOY, a direccionar su inversión recreativa en puntos estratégicos como Paipa.

Las aguas termales son quizá el principal atractivo turístico de este municipio, siendo este recurso es aprovechado casi en su totalidad por hoteles y centros recreacionales como: ITP (Instituto de turismo de Paipa), Hoteles Colsubsidio, Hoteles Sochagota, Hotel Casona el Salitre y el hotel Panorama, siendo este último el objeto de estudio para la presente investigación.

Las aguas termominerales usadas por el sector hotelero de Paipa permanecen un tiempo depositadas en dársenas y dependiendo de su nivel son evacuadas por

medio de una compuerta que se conecta al canal del Instituto de Turismo, para ser posteriormente evacuadas al canal de Vargas, que a su vez recibe aguas de la Quebrada Rejalgar y de drenajes en sus predios aledaños de Duitama y Nobsa. Este canal hace un recorrido total de 27.313 km hasta desembocar en el río Chicamocha, en el municipio de Duitama, sector Puente de la Balsa. La gestión de estos vertimientos ha sido realizada por el Distrito “USOCHICAMOGHA”.

Los esfuerzos para controlar esta problemática no han sido suficientes, pese al compromiso de todos los actores que generan aguas residuales termominerales, quienes han implementado mejoras a nivel de sus instalaciones para separar completamente este efluente de las aguas residuales domésticas y las aguas de escorrentía.

El costo de este manejo de los vertimientos termominerales es bastante elevado para los generadores, considerando que el beneficio recibido no se evidencia en reducción de los aportes contaminantes sobre el río Chicamocha, los parámetros más relevantes son Temperatura (°C), conductividad (µS/cm), Sulfatos (SO₄) y Cloruros (Cl⁻).

Paradójicamente, estos parámetros son inherentes al estado natural del agua termomineral antes de su captación y no se deben al uso que tiene esta en los hoteles, es decir, las variaciones a nivel de calidad antes y después del uso son irrelevantes.

La normatividad aplicable a vertimientos (Resolución 631 de 2015) no contempla límites permisibles para vertimientos de actividades recreativas y mucho menos, para los efluentes de aguas termominerales. Los estudios realizados hasta la fecha por los generadores del sector, consideran los parámetros establecidos en el Artículo 15. de la Resolución 0631 de 2015, sin embargo 24 de los 53 análisis solo requieren reporte, por lo cual no obliga a un nivel de reducción o a una meta clara de cumplimiento.

El Río Chicamocha en el sector Puente Chámeza (Zona de vertimiento), tiene uso principalmente agrícola, las comunidades que desarrollan esta actividad han manifestado históricamente su inconformidad por el manejo realizado a las aguas residuales termominerales, debido al alto contenido de sales que aportan afectando actividades como el riego.

Corpoboyacá es la autoridad ambiental con jurisdicción en el sector, quien en cumplimiento al PORH y los objetivos de calidad de la cuenca alta del Río Chicamocha, y atendiendo las numerosas quejas realizadas por diferentes usuarios ha venido aplicando con mayor rigurosidad las exigencias ambientales sobre los generadores. Esta corporación ha individualizado la responsabilidad de cada generador, evitando que estos se escuden en el manejo actual que realiza USOCHICAMOGHA, en tal virtud se está exigiendo una gestión individual del vertimiento.

El Hotel Panorama representa menos del 25% de las aguas termominerales generadas por el sector hotelero del municipio, sin embargo, debido a la exigibilidad

de manejos individuales de los efluentes, es necesario determinar mediante modelos de simulación, la contribución de contaminantes derivada del uso y descarga de estas aguas y su nivel de cumplimiento a la normatividad.

1.3.2. Pregunta de investigación

¿Cuál es la influencia del vertimiento termomineral del Hotel Panorama (Paipa) sobre la calidad del Río Chicamocha?

1.3.3. Variables del problema

- Parámetros fisicoquímicos del vertimiento y la fuente receptora (*Resolución 0631 de 2015 y Resolución 3560 de 2015 de Corpoboyacá*).

1.4. JUSTIFICACIÓN

El sector hotelero del municipio de Paipa es una gran fuente de generación de empleos directos e indirectos y un foco de crecimiento económico para el municipio de Paipa. Este sector se encuentra concentrado en cercanías al Lago Sochagota y sus hoteles más reconocidos aprovechan el recurso hídrico termomineral que aflora en la zona para el uso en piscinas, jacuzzis, sauna, turco, baños medicinales, hidroterapia y lodoterapia.

El uso de este recurso hídrico genera grandes caudales de vertimiento termomineral continuo en temporada alta y fines de semana, dado que el volumen necesario para el funcionamiento de piscinas debe ser reemplazado continuamente para mantener la temperatura y no hay lugar a almacenamiento. Al problema del caudal, se suma el hecho de que las aguas termominerales naturalmente tienen niveles elevados en algunos parámetros como Temperatura (°C), conductividad ($\mu\text{S}/\text{cm}$), Sulfatos (SO_4) y Cloruros (Cl^-) que exceden cualquier límite permisible para su descarga a fuente hídrica superficial.

De la misma manera, existe un vacío normativo, dado que la Resolución 631 de 2015 no contempla límites permisibles para vertimientos de actividades recreativas y mucho menos, para los efluentes de aguas termominerales. Al respecto la autoridad ambiental ha sugerido considerar los parámetros establecidos en el Artículo 15 de la Resolución 0631 de 2015 de esta norma, sin embargo 24 de los 53 análisis solo requieren reporte, por lo cual no se obliga a un nivel de reducción o a una meta clara de cumplimiento.

Por otro lado, la gestión que se realiza actualmente para los vertimientos es

conjunta, es decir, todos los generadores vierten en un mismo punto después del “tratamiento” que realiza USOCHICAMUCHA (Distrito de Riego y Drenaje de gran escala del Alto Chicamocha y Firavitoba). Este manejo no ha evidenciado eficiencia en remoción de contaminantes, dado que no cuenta con PTAR y se ha limitado más al control del caudal antes del vertimiento, proceso por el cual el generador en estudio paga cerca de \$1.500.000 mensualmente.

Pese a que el Hotel Panorama aporta menos del 25% de los caudales de vertimientos termominerales generados por el municipio, la autoridad ambiental ha solicitado, en el marco de su trámite de permiso de vertimientos, proyectar un modelamiento y gestión individual de las aguas termominerales antes de su descarga en el río Chicamocha, tramo 2.

1.5. HIPÓTESIS

- El comportamiento del vertimiento termomineral del Hotel Panorama sobre el río Chicamocha no genera variaciones significativas en la fuente debido a la alta capacidad de dilución del cuerpo de agua.

1.6. OBJETIVOS

1.6.1. Objetivo general

- Evaluar el comportamiento del vertimiento termomineral generado por el Hotel Panorama (Paipa) sobre la fuente receptora Río Chicamocha, aplicando el modelo Qual2K a partir de datos de entrada provenientes de información secundaria.

1.6.2. Objetivos específicos

- Establecer mediante información secundaria, las características físicoquímicas y microbiológicas del vertimiento y de la fuente receptora en el punto del vertimiento.
- Analizar el comportamiento de la descarga termomineral del Hotel Panorama bajo tres escenarios: 1) Sin la existencia del vertimiento en el tramo; 2) Vertimiento en condiciones actuales y 3) Vertimiento con características de cumplimiento a la norma.
- Determinar el nivel de variación entre la calidad del agua termomineral en su estado natural y la calidad tras su uso netamente recreativo en el Hotel Panorama.

2. MARCOS DE REFERENCIA

2.1. MARCO CONCEPTUAL

- **Agua termal:** Se define como aquella que se emana a la superficie con una temperatura de 5°C más alta que la temperatura superficial, el agua viene de las capas subterráneas, que son ricas en minerales, por lo que se le atribuye a tener propiedades terapéuticas. El agua termo mineral se puede clasificar según diferentes aspectos, como bacteriológico, fisicoquímico, entre otros, pero generalmente se clasifican según el componente mineral que mayormente presenta, por lo que hay aguas que son altamente sulfuradas, cloruradas, sulfatadas, ferruginosas, bicarbonatadas, etcétera; variable que depende del lugar donde nacen este tipo de aguas.¹
- **Descarga hídrica residual:** Hace referencia a la descarga de agua residual proveniente de un vertimiento que dependiendo de su origen hídrico y carga contaminante .
- **Aguas Residuales no Domésticas, (ARnD):** Tienen origen en actividades distintas a las actividades domésticas
- **Estudio de calidad de agua residual:** son una serie de análisis fisicoquímicos y microbiológicos que se realiza a un vertimiento de agua residual de cualquier origen, en el que se determinan diferentes parámetros como color, oxígeno disuelto, presencia de coliformes, sulfatos, cloruros. pH entre otros, cuyos resultados indican la calidad del agua y si son de alto riesgo para la fuente de agua receptora y la salud humana.²
- **Coliformes:** son un grupo de bacterias indicadores de calidad sanitaria hídrica. Existen dos clases: coliformes fecales que provienen del tracto intestinal de animales y que son los que indican mayor riesgo en afecciones humanas y por otro lado están las coliformes que son residentes naturales en el suelo y agua, que no necesariamente son patógenas³.

¹ MAXE. María Raquel. Estudio de la calidad físico-química y mineromedicinal del agua termal de los Baños del Inca. UCV-HACER: Revista de investigación y cultura [Online], enero-junio 2015, Vol. 4, Nº. 1, 2015. Disponible en internet: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5472524>. ISSN- e 2414-8695, ISSN 2305-8552

² YUPANQUI. Edson Gilmar. Análisis Fisicoquímico del Fuentes de Aguas termominerales del Callejón de Huaylas. Trabajo de grado Magister en Química. Lima-Perú: Pontificia Universidad Católica del Perú. Escuela de graduados. 2006. 134 p.

³ PERDOMO C, CASANOVA O, CIGANDA V. Contaminación de aguas subterráneas con nitratos y coliformes en el litoral sudoeste del Uruguay. Universidad de la República de Uruguay. Revista Agrociencia [Online], 2001. Vol 5, No 1 (2001). 10-22 p. Disponible de internet en <http://www.fagro.edu.uy/agrociencia/index.php/directorio/article/view/565>

- **Carga contaminante.** Es un indicador primordial de la calidad del agua, se obtiene al multiplicar la concentración de la sustancia por el caudal, obteniendo una medida de (masa/tiempo)
- **Caudal ambiental.** Volumen de agua mínimo en una fuente, requerido para el sostenimiento de los ecosistemas acuáticos y el mantenimiento de los servicios ecosistémicos ofrecidos por esta.
- **Objetivo de calidad.** Define, en términos de calidad, la idoneidad de un cuerpo hídrico para su uso.
- **Vertimiento puntual.** Es aquel que se realiza en un punto determinado de descarga.
- **Zona de mezcla.** Es la zona en la cual se produce una homogénea mezcla del vertimiento con la fuente hídrica receptora, en este tramo se permite exceder los criterios de calidad de la fuente receptora.
- **Modelo:** Un modelo es una abstracción de la realidad, estableciendo relaciones que permiten simular el comportamiento de fenómenos naturales, sociales, ambientales, entre otros.
- **Representación conceptual:** Es una representación gráfica que facilita la comprensión del modelo.
- **Análisis de sensibilidad.** Previo a la calibración del modelo, se hace un análisis de sensibilidad que consiste en identificar los parámetros más sensibles ante cambios pequeños en sus valores; con esto se logra ser más eficiente en la calibración. En esta etapa se busca encontrar los parámetros que tienen mayor peso o relevancia en la calibración del modelo⁴. (IDEAM, 2018)
- **Calibración del modelo.** La calibración permite evaluar la idoneidad del modelo mediante una comparación de valores observados frente a valores simulados.
- **Validación del modelo.** Es la comprobación de que el modelo es válido dentro de un rango de exactitud esperado.

⁴ INSTITUTO DE HIDROLOGÍA, METEOROLOGÍA Y ESTUDIOS AMBIENTALES-IDEAM. Protocolo de modelación hidrológica e hidráulica. IDEAM:2018

- **Simulación.** Al tener el modelo calibrado y validado, se realiza la simulación con el modelo a utilizar.

2.2. MARCO TEÓRICO

Agua Termo mineral

El agua termo-mineral hace referencia a el agua que aflora a temperaturas mayores que el promedio anual de la temperatura del ambiente, que además proviene de capas subterráneas, que son ricas en minerales .La composición química del agua subterránea depende directamente de la estructura geológica, las características hidrogeológicas e hidroquímicas y, como tal, representa un resultado de salida de todos los factores y procesos que tienen lugar en el medio ambiente.(DERJAN, 2014)⁵

Clasificación de las aguas termo minerales

El agua termo-mineral en base a sus diferentes características y aplicaciones la clasificación de estas aguas se muestra en siguiente la tabla.

⁵ YUPANQUI. Edson Gilmar. Análisis Fisicoquímico del Fuentes de Aguas termominerales del Callejón de Huaylas. Trabajo de grado Magister en Química. Lima-Perú: Pontificia Universidad Católica del Perú. Escuela de graduados. 2006. 134 p.

Figura 1. Clasificación de las aguas termo minerales

| Clasificación según | Características y usos | |
|--|---|--------------|
| Origen ^a | Superficiales y profundas o magmáticas. | |
| Temperatura ^b | Mesotermiales o tibias de 21 a 30 °C | |
| | Termales o calientes de 31 a 50 °C | |
| | Hipertermiales o muy calientes mayores de 50 °C. | |
| Presión osmótica ^{c,a} | Hipotónicas, osmolalidad < 0, '55 ^(*) ; o < 320 mmol Na ⁺ y Cl ⁻ | |
| | Isotónicas, osmolalidad = 0, '55; o 320 a 330 mmol Na ⁺ y Cl ⁻ | |
| | Hipertónicas, osmolalidad > 0, '55; o > 330 mmol Na ⁺ y Cl ⁻ (**) | |
| Sólidos solubles a 180 °C ^a | Oligomineralizadas, residuo inferior a 0,2 g/L | |
| | Medio mineralizadas, residuo entre 0,2 y 1 g/L | |
| | Mineralizadas, residuo superior a 1 g/L: | |
| | - Mineralizada débil : residuo entre 1 a 10 g/L | |
| | - Mineralizada media : residuo entre 10 a 50 g/L | |
| Emisiones ^c | - Mineralizada fuerte : residuo mayor a 50 g/L | |
| | Carbónicas, con altos contenidos de CO ₂ . | |
| | Sulfuradas, con contenido mayor a 1 mg/L de H ₂ S | |
| Propiedades terapéuticas ^c | Radioactivas, con radioemisiones mayores a 50 UML ^(***) | |
| | Diuréticas | Disolventes |
| | Depurativas | Estimulantes |
| | Reconstituyentes | Laxantes |
| | Sedantes | |

Fuente: (Yupanqui, 2006)

En el agua termo-mineral es común que exista la presencia de iones de carbonato que son dominantes porque a veces se ve aumentados algunos valores de pH. Por lo general en aguas de balneario hay una presencia más significativa de iones sulfato que se pueden usar para tratar una gran gama de enfermedades, desde infecciones de la piel hasta problemas respiratorios e inflamaciones de la piel. Las aguas con sulfato también se pueden usar para tratar diferentes enfermedades, sin embargo su agua residual puede generar problemas ambientales en la fuente receptora.⁶

Iones minerales comunes en aguas termo-minerales:

Dependiendo la riqueza mineral de las rocas de las que provienen las aguas termo-minerales, se determinan los iones que están presentes en el agua, sin embargo los

⁶ Ibid. p. 12

sulfatos están presentes en la mayoría de las aguas termales, para el caso del yacimiento de agua termal de Paipa, se han encontrado altas concentraciones de sulfato y cloruros, los cuales en altas concentraciones pueden generar un impacto en la fuente receptora del agua residual

Análisis de calidad del agua

La disponibilidad del agua está asociada no solo a la presencia de suficientes volúmenes, sino también a la garantía de adecuados niveles de calidad para el ser humano. Por lo general las aguas residuales de industrias, lugares comerciales o las domesticas van a dar a fuentes receptoras que finalmente llegan a grandes ríos, en donde se hace uso del agua, generando incluso problemas de salud.

Los estudios de calidad de agua son usados para determinar la carga contaminante que tiene un vertimiento, o fuente hídrica. Existen diversos métodos para evaluar la calidad del agua. Para determinar la calidad de agua de algún cuerpo receptor se deben hacer análisis fisicoquímicos y microbiológicos. En el caso específico de agua termal se debe medir cloruros y sulfatos, pues al ser una agua mineral suelen contener este tipo de minerales que al estar presentes todas concentraciones en agua residual puede generar problemas ambientales⁷.

Análisis microbiológico

En las aguas termo mineral es común encontrar bacterias termófilas (resistentes a la temperatura) debido a las características inusuales que tiene este tipo de agua, en donde se crean nichos ecológicos que son aprovechados por organismos termófilos presentes en los dominios de bacteria y arcea. Este tipo de bacterias no representan una problemática ambiental debido a que son parte de la naturaleza, sin embargo en balnearios o piscinas les adicionan cloro al agua, matando gran parte de ellas⁸.

En el agua residual, sea doméstica, industrial o térmica, es necesario realizar un análisis de presencia o ausencia de coniformes, pues esto generan problemáticas ambientales y de salud, indicando mala calidad del agua.

Las coliformes son una familia de bacterias que están presentes comúnmente en el suelo, plantas, animales, incluso en los humanos.

Estas bacterias son indicador de contaminación generalmente en la capa superficial del agua o sus sedimentos. A su vez son el principal riesgo sanitario pues representan posibles microorganismos patógenos causantes de enfermedades.

⁷ QUIROZ. Luis, IZQUIERDO. Elena, MENÉNDEZ. Carlos, Aplicación del índice de calidad de agua en el río Portoviejo, Ecuador [Online], VOL. XXXVIII Sep-Dic 2017. Disponible en internet en: <http://scielo.sld.cu/pdf/riha/v38n3/riha04317.pdf>. 1-9 p.

⁸ CARVAJAL, Catalina y PERDOMO, Natalia. Caracterización fenotípica de la cepa sulfato reductora termofílica USBA 53 aislada del manantial Ojo del Diablo en Paipa, Boyacá. Trabajo de grado Microbiología Industrial. Bogotá D.C.: Pontificia Universidad Javeriana, 2008.

Para determinar si en el agua hay presencia de coliformes se hacen muestreos que arrojan dos tipos de coliformes: Totales y Fecales. Los fecales tienen origen en el tracto intestinal de animales y los totales incluyen aquellos que constituyen naturalmente el suelo y agua. Pero son los primeros, los que representan mayor riesgo biosanitario para la salud pública.

Modelación para la calidad del agua

Para determinar la calidad del agua existe una gran variedad de modelos matemáticos, con los cuales es posible establecer cómo se comporta un vertimiento en un cuerpo receptor de agua. Las principales diferencias entre los diferentes tipos de modelos son la reacción (transformación de los determinantes de calidad de agua) y en los procesos de transporte (advección y dispersión), a continuación se describen brevemente algunos de los modelos más usados⁹

- **Modelo de Flujo a Pistón:** Es un modelo que considera condiciones de flujo estable e hidrología constante de la corriente. No tiene en cuenta fenómenos de transporte de dispersión, solamente advección y reacción.¹⁰
- **Modelo de Streeter Phelps:** Es un modelo que permite simular el comportamiento del oxígeno en una corriente con la descarga de un vertimiento con características orgánicas. Este representa dos procesos: En primer lugar está la descomposición bacteriana y en segundo lugar está la aireación¹¹.
- **Modelo QUAL2E:** Programa que permite modelar la calidad de agua en los ríos y corrientes. El programa es usado para la modelación de sistemas unidimensionales, donde se pueden representar corrientes con sus ramificaciones, además puede simular cargas puntuales y no puntuales, con flujo permanente no uniforme. El programa simula balance de calor y temperatura en una escala de tiempo diario.
- **Modelo QUAL2K:** programa para modelar la calidad del agua en ríos y corrientes, que permite dividir el sistema en segmentos diferentes, usa dos formas de DBO de acuerdo con la velocidad de oxidación, calcula la anoxia reducción en reacciones de oxidación a niveles más bajos de cero. Este tipo de modelo es parecido al anterior, pero posee elementos nuevos como ya se mencionaron.

Modelo EPD- RIV1: programa que simula la dimensión dinámica hidráulica y calidad del agua. Está basado en el programa CE-QUAL-RIV1. Este programa tiene dos módulos, uno de hidrodinámica que comúnmente se aplica de primero y el otro

⁹ QUEVEDO, Martín Daniel y ORDOÑEZ Jair. Modelo de calidad del agua vertimientos a cuerpo de agua superficial de agua proyecto vial: Doble calzada Rumichacha – Pasto – Tramo San Juan – Pedregal. Bogotá D.C.: Consorcio SH. Junio 2017.

¹⁰ ROJAS, Andrés Felipe. Aplicación de factores de asimilación para la priorización de la inversión en sistemas de saneamiento hídrico en Colombia. Trabajo de grado Magister en Ingeniería-Recursos Hídricos. Bogotá D.C.: Universidad Nacional de Colombia. Facultad de ingeniería, departamento de civil y agrícola, 2011

¹¹ Ibíd. p. 16

que es de calidad.¹².

Otros modelos: existen muchos más modelos muy utilizados en la modelación de alcantarillados, calidad del agua en ríos y en plantas de tratamiento de aguas residuales. Dentro de ellos tenemos: ADZ-QUASAR, integrated Catchment simulator (ICS), Hydroworks, Synopsis, West y Simba, CORMIX, AQUASIM, ACUATool, WASP, entre otros¹³.

2.3. MARCO JURÍDICO

A continuación, se presenta y describe el marco jurídico de orden nacional y regional que rige la temática de la investigación.

2.1.1. Marco jurídico Nacional

- **Decreto 1076 de 2015**

En el Capítulo 13. Disposiciones finales, Sección 20. Conservación y preservación de las aguas y sus cauces se establecen las restricciones en cuanto a vertimientos sobre fuentes superficiales.

Capítulo 3. Ordenamiento del recurso hídrico y vertimientos, en este capítulo se presentan las nociones para la comprensión del ordenamiento del recurso hídrico, se señala que los modelos de simulación de la calidad del recurso hídrico son un instrumento para el ordenamiento del mismo, y se hace referencia a la Guía Nacional de Modelación del Recurso Hídrico.

En la Sección 2 de este capítulo se establecen las posibles destinaciones genéricas de las aguas superficiales y subterráneas.

En la Sección 3 del mismo capítulo se señalan los criterios de calidad para destinación del recurso.

En la Sección 4, se establecen las sustancias y usuarios de interés sanitario para los vertimientos, las prohibiciones, actividades no permitidas y otras especificaciones relacionadas con los vertimientos.

En la sección 5 se establecen los requerimientos para la obtención del permiso de vertimientos.

Este capítulo se encuentra reglamentado por el Decreto 3930 de 2010, el Decreto 1594 de 1984, la Resolución 959 del 2018 y la Resolución 0631 de 2015.

¹² Ibíd. p. 17

¹³ QUEVEDO, Martín Daniel y ORDOÑEZ Jair. Op. Cit., p.16

- **Decreto – Ley 2811 de 1974:** “Por el cual se dicta el Código Nacional de Recursos Naturales Renovables y de Protección al Medio Ambiente”.

- **Decreto 3930 de 2010**

Este decreto establece las disposiciones relacionadas con los usos del recurso hídrico, el ordenamiento del recurso hídrico y los vertimientos al recurso hídrico, al suelo y a los alcantarillados.

Para la fecha de su publicación, el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial no había expedido la Guía Nacional de Modelación del Recurso Hídrico. Sin embargo, esta ya se encuentra adoptada mediante la Resolución 959 de 2018.

Esta guía también establece los usos del agua para las aguas superficiales, subterráneas y marinas, respecto al uso recreativo en su artículo 15 señala: “Se entiende por uso del agua para fines recreativos, su utilización cuando se produce: 1) Contacto primario, como en natación buceo y baños medicinales; 2) Contacto secundario, como en los deportes náuticos y la pesca.

En el Capítulo VI. *De los vertimientos* establece las prohibiciones, actividades no permitidas y demás generalidades en el tema, que en la mayoría de los casos son reglamentados por otras normas.

En el Capítulo VII. *De la obtención del permiso de vertimientos*, se establecen los requerimientos para la obtención del permiso de vertimiento y planes de cumplimiento.

En el Capítulo IX. *Reglamentación de vertimientos*, se faculta a la autoridad ambiental para reglamentar los vertimientos conforme a los resultados obtenidos en el Plan de Ordenamiento del Recurso Hídrico.

Este Decreto es modificado parcialmente por el Decreto No. 4728 del 23 de diciembre de 2010. Se da una modificación de los artículos 28, 34, 35, 52, 54, 61, 77 y 78.

- **Resolución 0631 de 2015¹⁴**

En esta norma se establecen las disposiciones aplicables a los vertimientos puntuales de aguas residuales. No se determinan límites máximos permisibles para los vertimientos puntuales de aguas de uso recreativo ni

¹⁴ COLOMBIA, MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE. Op. Cit., p.5

aguas termominerales.

Por lo tanto, a partir de lo que ha determinado la autoridad ambiental regional, el vertimiento objeto de la investigación se registrará por lo establecido en su *Artículo 15* de la Res. 631 de 2015.

- **Resolución 959 del 2018¹⁵:** *“Por medio de la cual se reglamenta parcialmente el artículo 2.2.3.3.1.7 del Decreto 1076 de 2015 y se dictan otras disposiciones”.*

A través de esta norma se adopta la Guía Nacional de Modelación del Recurso Hídrico para aguas superficiales continentales. Esta guía establece las directrices generales para la modelación matemática aplicada a la gestión integral del recurso hídrico que deberán aplicar las autoridades ambientales y los usuarios, de conformidad con lo establecido en el Decreto número 1076 de 2015. Dicha resolución entró en vigencia el 01 de enero de 2019.

2.1.2. Marco jurídico Regional

- **Resolución 3560 de 2015 de Corpoboyacá¹⁶:** *“Por medio de la cual se establecen los objetivos de calidad de agua en la cuenca alta y media del río Chicamocha a lograr en el periodo 2016-2025”.*

Esta Resolución establece los objetivos de calidad para la cuenca alta y media del río Chicamocha, el área del proyecto hace parte del tramo 2, cuyos usos actuales son: Consumo humano y doméstico, agrícola, pecuario, estético, dilución y asimilación, teniendo como objetivo de calidad el uso para consumo humano y doméstico.

- **Resolución 3382 de 2015 de Corpoboyacá¹⁷:** *“Por medio de la cual se adoptan los criterios de calidad del recurso hídrico dentro de la jurisdicción de Corpoboyacá”.*

Esta Resolución establece los criterios de calidad admisibles para la destinación del recurso según su uso.

¹⁵ COLOMBIA, MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE. Op. Cit., p.11

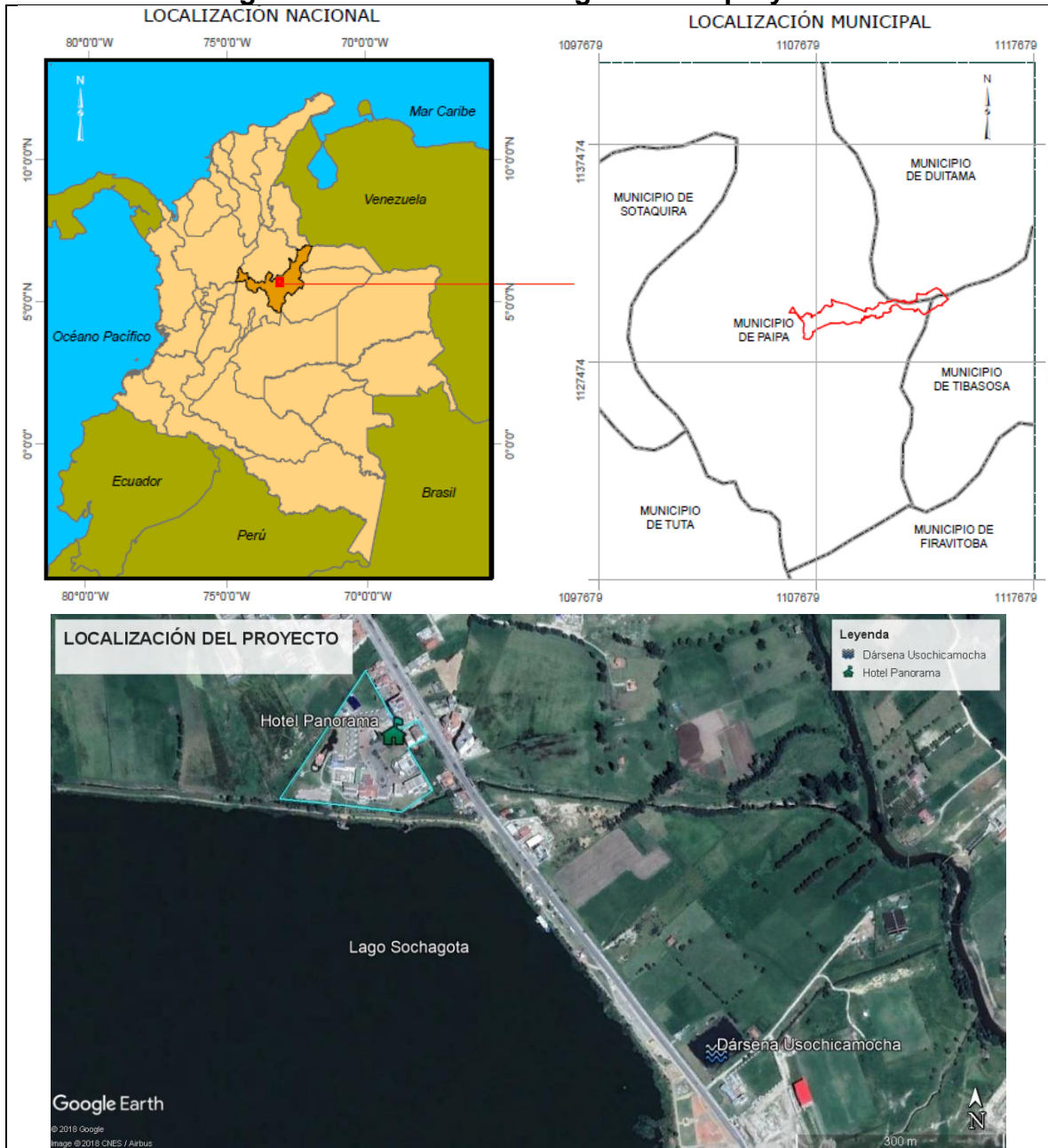
¹⁶ COLOMBIA, CORPORACIÓN AUTÓNOMA REGIONAL DE BOYACÁ. Op. Cit., p.6

¹⁷ COLOMBIA, CORPORACIÓN AUTÓNOMA REGIONAL DE BOYACÁ. Resolución 3382. (01, octubre, 2015). Por medio de la cual se adoptan los criterios de calidad del recurso hídrico dentro de la jurisdicción de Corpoboyacá.

2.4. MARCO GEOGRÁFICO

El Hotel Panorama se encuentra ubicado en la zona Urbana del municipio de Paipa, en límites con la vereda Canocas, aproximadamente a 1 km de la cabecera municipal, por la ruta que va de Paipa al complejo turístico del I.T.P., se identifica con NIT No. 891.800.213-8, es un establecimiento sin ánimo de lucro, propiedad de la caja de Compensación Familiar de Boyacá – COMFABOY.

Figura 2. Localización Geográfica del proyecto



Fuente: Autora

Tabla 1. Coordenadas del Proyecto

| PUNTO | COORDENADAS GEOGRÁFICAS | | COORDENADAS PLANAS | |
|-------|-------------------------|--------------|--------------------|-------------|
| | ESTE | NORTE | X | Y |
| 1 | 73° 6'59.07"W | 5°46'7.58"N | 1106455.809 | 1129756.698 |
| 2 | 73° 6'55.05"W | 5°46'13.53"N | 1106579.199 | 1129939.706 |
| 3 | 73° 6'53.46"W | 5°46'10.81"N | 1106628.266 | 1129856.223 |
| 4 | 73° 6'52.59"W | 5°46'11.22"N | 1106655.015 | 1129868.865 |
| 5 | 73° 6'52.16"W | 5°46'10.44"N | 1106668.287 | 1129844.923 |
| 6 | 73° 6'53.05"W | 5°46'9.96"N | 1106640.926 | 1129830.130 |
| 7 | 73° 6'51.87"W | 5°46'7.97"N | 1106677.339 | 1129769.054 |
| 8 | 73° 6'53.37"W | 5°46'6.97"N | 1106631.234 | 1129738.254 |

Fuente: INCO A&J S.A.S. – Expediente OOPV-0147/17 Corpoboyacá

La cuenca alta del Río Chicamocha (240301) se encuentra localizada en la parte centro noroccidental del departamento de Boyacá, tiene influencia en los municipios de Tunja, Sora, Soracá, Motavita, Siachoque, Chivatá, Oicatá, Cómbita, Tuta, Sotaquirpa, Toca, Tuta, Sotaquirá, Pesca, Firavitoba, Tibasosa, Paipa, Duitama, Iza, Cuítiva, Sogamoso, Nobsa, Santa Rosa de Viterbo y Floresta.

2.5. ESTADO DEL ARTE

La guía Nacional para la modelación del recurso hídrico hace énfasis en que “La modelación de la calidad del agua constituye una herramienta fundamental para la planeación, diseño e implementación de programas de control de la contaminación de los recursos hídricos. La evolución de la modelación ha generado nuevas oportunidades en la optimización económica y operacional de la toma de decisiones relacionadas con la gestión de los recursos hídricos, sumado a los avances informáticos que permiten que dichos modelos sean cada vez menos costosos, más accesibles y fáciles de usar e interpretar. La utilidad de este tipo de modelos consiste en que, adecuadamente calibrados y validados, pueden ser usados para la estimación del impacto generado sobre el cuerpo de agua, como consecuencia de diferentes escenarios futuros, incluyendo reducción de la carga contaminante, diferentes condiciones hidro-climáticas (incluyendo los efectos del cambio climático), entre otros”¹⁸.

Las corrientes hídricas son cuerpos dinámicos así como su comportamiento ante la presencia de contaminantes. Esto ha incentivado en los últimos años la creación de múltiples modelos matemáticos para el análisis de contaminantes sobre corrientes naturales, dentro de ellos se los más populares son: QUAL2K, QUAL2Kw, WASP, entre otros.

Estos últimos fueron desarrollados por la Agencia de Protección Ambiental (EPA) perteneciente al gobierno de los Estados Unidos. El presente estudio, será

¹⁸ COLOMBIA, MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE, Op. Cit. p.10.

desarrollado con ayuda del modelo QUAL2Kw, desarrollado con el nombre de QUAL2K para la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos por Chapra y Pelletier en el año 2003 y posteriormente mejorado en el año 2008, denominándose QUAL2Kw¹⁹. El esquema general de este modelo, ha permitido su aplicación en innumerables estudios a nivel nacional e internacional.

Modelo físico para el análisis de la descarga térmica en la zona de mezcla (Estudio de caso: North Giza Power Plant, Egipto), esta investigación tuvo como objetivo investigar el efecto de los efluentes con temperaturas por encima de la temperatura ambiente y su comportamiento en la zona de mezcla, mediante un modelo aplicado a la planta de energía de North Giza, Egipto. Los resultados del modelo demostraron que la zona de mezcla depende del régimen del flujo, por lo tanto, el área de mezcla aumenta al aumentar el caudal del efluente y disminuye al aumentar el flujo del río. Se encontró que en caso de aumentar el exceso de temperatura por encima del ambiente en el emisario y disminuir la descarga del efluente se aumentaba la zona de mezcla.

El QUAL2K es un modelo integral de calidad de agua de estado estable que se dice presenta algunas limitaciones, entre las que se encuentran (CASTRO, 2015)²⁰:

- “El modelo no es muy flexible y por tanto se encuentra algo limitado en cuanto a los parámetros y procesos que pueden ser simulados. Por ejemplo, no se incluye la degradación de hidrocarburos. Los vertidos de derivados del petróleo no pueden modelarse
- El modelo es unidimensional y por tanto asume que el río tiene una mezcla perfecta lateral y vertical. Esta es una asunción razonable para la mayoría de los ríos, excepto cuando los ríos son particularmente anchos, profundos o tienen un movimiento lento. En estos casos debería considerarse un modelo bidimensional”

Bajo esta premisa, una investigación desarrollada en 2018 por la Southwest Jiaotong University (China) realizó un análisis de sensibilidad de parámetros de Oxígeno disuelto en el modelo QUAL2K, integrando un modelo hidrológico y uno de temperatura, seleccionando OD como índice de estudio. Esta investigación concluyó que el proceso más importante que afecta el OD es el re oxigenación del río, la oxidación de la DBO, la nitrificación del nitrógeno amoniacal. Así mismo, las algas de la fotosíntesis del fondo tienen un cierto impacto en el Oxígeno disuelto, la respiración de algas es el impacto relativamente más pequeño sobre el OD²¹.

¹⁹ CASTRO, Mayra Andrea. Aplicación del Qual2kw en la modelación de la calidad del agua del río Guacaica, departamento de Caldas, Colombia. Manizales, Colombia.: Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ingeniería y Arquitectura, departamento de Ingeniería Química. 2015.

²⁰ Ibíd. p. 26

²¹ CHEN, Q.S *et al.* Parameters sensitivity analysis of DO in water quality model of QUAL2K. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science [Online]. Julio 2018. Volume 191, Issue 1. Disponible en internet en <https://www-scopus-com.ucatolica.basesdedatosezproxy.com/record/display.uri?eid=2-s2.0->

Qual2K ha sido ampliamente usado paralelamente con otros softwares de tipo hidrológico o matemático altamente conocidos como HEC-RAS y MATLAB. En el año 2018, la revista Hydrology Research en India, publica un estudio del departamento de Ingeniería Civil de instituto de Tecnología Delhi, en el cual propone una metodología de calibración secuencial para cualquier modelo de calidad del agua, utilizando estimaciones específicas del alcance de los parámetros del modelo para predecir de una manera más precisa las características de la calidad del agua. Se utiliza el MATLAB para optimizar los promedios matemáticos. Se tomó como tramo de análisis el del Río Yamuna, observando sus variaciones de calidad para calibrar correctamente el modelo. Se logra capturar un comportamiento del sistema más aproximado a la realidad que a futuro puede contribuir a la toma de mejores decisiones en lo relativo a las políticas de gestión del recurso hídrico²².

La revista International Journal of Civil Engineering and Tecnology, publica en 2017 una investigación realizada por el Departamento de Ingeniería civil del instituto Manipal Tecnología en Karnataka, India, denominada “*Aplicación del modelo Qual2k para la predicción de la calidad del agua en un tramo del río Pamba*”. El análisis fue realizado para un tramo de 20,63 km del río para analizar el efecto de una granja lechera. Realizaron muestreos al río en invierno y verano, demostrando como la calidad el agua cambió a lo largo de todo el tramo del río. Los datos de verano fueron utilizados para la calibración y validación del modelo. A partir de la aplicación del modelo, se concluyó que sus resultados se encuentran dentro de los valores medidos en las diferentes estaciones y que la ubicación propuesta para el vertimiento de la granja se encontró dentro de los estándares establecidos²³.

En el año 2017, el Departamento de Ingeniería hidraulica y ambiental de la universidad Politécnica de Bucharest (Romania), efectuó un estudio sobre el curso inferior del río Danubio para analizar la aplicabilidad del modelo QUAL2K en ríos grandes, esto considerando que el QUAL2K es considerado un modelo estacionario unidimensional y se ha cuestionado su aplicación en grandes corrientes. El modelo fue calibrado utilizando datos de abril de 2008 (primavera) y su validación se realizó

[85058128481&origin=resultslist&sort=plf-f&src=s&st1=qual2k&st2=&sid=131c1895114b98372765c483f4107852&sot=b&sdt=b&sl=21&s=TITLE-ABS-KEY%28qual2k%29&relpos=8&citeCnt=0&searchTerm](https://www.scopus.com/ucatalog/basesdedatosezproxy.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-85058128481&origin=resultslist&sort=plf-f&src=s&st1=qual2k&st2=&sid=131c1895114b98372765c483f4107852&sot=b&sdt=b&sl=21&s=TITLE-ABS-KEY%28qual2k%29&relpos=8&citeCnt=0&searchTerm)

²² ABIDIN, M.Z. *et al.* Hydrological change effects on Sungai Langat water quality. Sains Malaysiana. Julio 2018. [Online]. Disponible en internet en: <https://www.scopus.com/ucatalog/basesdedatosezproxy.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-85051855045&origin=resultslist&sort=plf-f&src=s&st1=qual2k&st2=&sid=131c1895114b98372765c483f4107852&sot=b&sdt=b&sl=21&s=TITLE-ABS-KEY%28qual2k%29&relpos=10&citeCnt=0&searchTerm=>. Volume 47, Issue 7.

²³ ASHWANI, S. *et al.* Application of qual2k model for prediction of water quality in a selected stretch of pamba river. International Journal of Civil Engineering and Technology [Online]. Volume 8. Disponible en internet <https://www.scopus.com/ucatalog/basesdedatosezproxy.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-85022013705&origin=resultslist&sort=plf-f&src=s&st1=qual2k&st2=&sid=131c1895114b98372765c483f4107852&sot=b&sdt=b&sl=21&s=TITLE-ABS-KEY%28qual2k%29&relpos=14&citeCnt=3&searchTerm> = Issue 6.

utilizando datos de septiembre de 2008 (otoño) en cuatro escenarios para control de DBO y OD. Los resultados obtenidos de la aplicación del modelo demostraron que la simulación fue similar a informes técnicos ya realizados y se llegó a la conclusión de que el modelo QUAL2K es una herramienta válida para simular la calidad del agua en grandes ríos²⁴.

Un estudio similar fue realizado en China para simular la calidad del agua del río Wei, el objetivo de este estudio fue determinar la validez del modelo QUAL2K, teniendo OD, nitrógeno amoniacal y Fósforo total como índices de predicción de la calidad del agua. Los resultados obtenidos concordaron con los medidos, bajo errores relativos en algunas concentraciones, pero dentro del rango aceptable de 10%, por lo tanto, se concluyó que el efecto de la simulación con QUAL2K fue bueno.

El modelo QUAL2K también ha sido de gran utilidad para evaluar la eficiencia de estrategias de purificación aplicadas a corrientes. Un estudio relacionado con esta aplicabilidad del modelo es el realizado por El *Laboratorio estatal para el control de la contaminación y reutilización de los recursos* en China. La corriente objeto de estudio fue el río Tianlai en Jiangsu, en el cuál fue aplicada a escala de laboratorio una combinación de tecnologías de purificación ecológica entre las cuales estaban: Sogas biológicas, fitorremediación y carbón activado para examinar los coeficientes de degradación bajo aguas dinámicas, que posteriormente fueron ingresados al modelo. Esto permitió determinar la combinación de tecnologías y el tiempo de retención hidráulica para cumplir los límites establecidos en China para aguas superficiales²⁵.

Otra importante aplicación del modelo QUAL2K es la modelación de temperatura, siendo este parámetro un factor de gran influencia en los procesos biofísicos de entornos lóticos, a futuro, este aspecto toma cada vez más relevancia considerando las variaciones provocadas por el cambio climático y sus consecuencias para la calidad del agua y los ecosistemas. En el año 2017, el Colegio de Geografía, Tierra y ciencias ambientales de las Universidad de Birmingham en Reino Unido, teniendo en cuenta las limitaciones de estudios existentes frente al análisis de temperatura, ha venido utilizando cada vez más modelos para generar estimaciones de

²⁴ ISMAIL, A.H. *et al*, Application of a one-dimensional steady state model for simulation the water quality in a large river: A case study of the danube river. UPB Scientific Bulletin, Series D: Mechanical Engineering. [Online]. Volume 79. Issue 2. Disponible en internet [https://www-scopus-com.ucatolica.basesdedatosezproxy.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-](https://www-scopus-com.ucatolica.basesdedatosezproxy.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-85020289296&origin=resultslist&sort=plf-)

[85020289296&origin=resultslist&sort=plf-f&src=s&st1=qual2k&st2=&sid=131c1895114b98372765c483f4107852&sot=b&sdt=b&sl=21&s=TITLE-ABS-KEY%28qual2k%29&relpos=15&citeCnt=1&searchTerm=](https://www-scopus-com.ucatolica.basesdedatosezproxy.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-85020289296&origin=resultslist&sort=plf-f&src=s&st1=qual2k&st2=&sid=131c1895114b98372765c483f4107852&sot=b&sdt=b&sl=21&s=TITLE-ABS-KEY%28qual2k%29&relpos=15&citeCnt=1&searchTerm=)

²⁵ ZHU, W. *et al*. Application of QUAL2K model to assess ecological purification technology for a polluted river. International Journal of Environmental Research and Public Health. [Online]. 2015. Volume 12. <https://www-scopus-com.ucatolica.basesdedatosezproxy.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-84930674860&origin=resultslist&sort=plf-f&src=s&st1=qual2k&nlo=&nlr=&nls=&sid=131c1895114b98372765c483f4107852&sot=b&sdt=b&sl=21&s=TITLE-ABS-KEY%28qual2k%29&relpos=24&citeCnt=4&searchTerm=> . Issue 2.

temperatura en ríos. El estudio se basó en las condiciones críticas de varios ríos a partir de investigaciones existentes, con el fin de establecer las limitaciones existentes en los modelos que se han implementado y establecer mejoras para modelos futuros²⁶.

Siguiendo esta misma temática, la Journal of Environmental Engineering publica en 1998 un artículo llamado: Simulación de la temperatura de la corriente de áreas ribereñas boscosas: Desarrollo del modelo a escala de cuenca. Este estudio no implementó QUAL2K, pues dada su esencia hidrográfica, partió de un análisis de simulación de temperaturas de la corriente en escala de cuenca, estimando la cantidad de radiación que recibía la corriente en cada tramo analizando la dinámica de sombreado de la topografía y la vegetación ribereña mediante herramientas computacionales que relacionaban la posición del sol frente a la ubicación de la corriente y la densidad de vegetación en la ribera. Esto permitió el desarrollo de un programa llamado SHADE que arrojaba unos datos de radiación solar para simulación en el programa de simulación hidrológica FORTRAN (HSPF). Este estudio fue de gran utilidad para proporcionar una herramienta cuantitativa que relacionara el manejo de los bosques ribereños con la temperatura de las corrientes²⁷.

A escala nacional, también han sido desarrollado múltiples análisis y aplicaciones del modelo QUAL2K. Un estudio realizado por el Docente Investigador Jorge Virgilio Rivera Gutiérrez, analiza el comportamiento de la materia orgánica en la zona más impactada del río Frío, corriente receptora de los vertimientos domésticos e industriales vertidos por 383.000 habitantes de Floridablanca y Bucaramanga, ubicada al sur occidente del Departamento de Santander. El estudio utilizó el modelo dinámico unidimensional QUAL2K, a partir de los datos de 6 monitoreos para captar información hidrobiológica, microbiológica y meteorológica del segmento hidráulico de 6 km en 7 tramos, dentro de los cuales existen 5 vertimientos, 1 dilución y 1 abstracción clandestina que da como resultado un balance de 2,03 m³/s al final del segmento. La toma de muestras se realizó en época de estiaje teniendo en cuenta el tiempo de viaje del río, los puntos de monitoreo fueron establecidos aplicando campañas de inspección con trazador conservativo

²⁶ DUGDALE, S.J, HANNAH, D.M., MALCOM, I.A. River temperature modelling: A review of process-based approaches and future directions. Earth-Science Reviews. [Online]. 2017. Volume 175. Disponible en internet en <https://www-scopus-com.ucatolica.basesdedatosezproxy.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-85033610345&origin=resultslist&sort=plf-f&src=s&st1=qual2k&st2=thermal&sid=8418ee50dbf673140d2fb10317aedca2&sot=b&sdt=b&sl=30&s=%28ALL%28qual2k%29+AND+ALL%28thermal%29%29&relpos=12&citeCnt=13&searchTerm=>

²⁷ CHEN, Y, D. *et al.* Stream temperature simulation of forested Riparian areas: I. Watershed-scale model development. Journal of Environmental Engineering. [Online] 1998. Volume 124. Issue 4. Disponible en Internet en <https://www-scopus-com.ucatolica.basesdedatosezproxy.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-0031903458&origin=reflist&sort=plf-f&src=s&st1=qual2k&st2=thermal&sid=8418ee50dbf673140d2fb10317aedca2&sot=b&sdt=b&sl=30&s=%28ALL%28qual2k%29+AND+ALL%28thermal%29%29&recordRank=>

(NaCl). La calibración del modelo se realizó con la herramienta matemática que aplica las *Simulaciones de Monte Carlo* por medio del software MCAT y la metodología GLUE. Dentro de los principales hallazgos de este estudio están: 1) Incremento de la conductividad aguas abajo del primer tramo por el impacto de vertimientos orgánicos. 2) El caudal aumentó 1.63 m³/s debido a los efluentes contaminantes domésticos y las áreas de las secciones transversales del río oscilaron entre 1.8 y 6.9 m². 3) El caudal perdido se calculó en 0,87 m³/s debido a la extracción clandestina y la evaporación. 4) Se da una pérdida de oxígeno disuelto a lo largo del tramo, con una tasa de reaeración decreciente. 5) El modelo Qual2k V2.07 logra simular con una parametrización promedio de R²=0,9 esto indica que el modelo se adecúa a las condiciones de modelamiento dinámico en ríos de montaña de alta rugosidad y baja profundidad. 6) Solamente ocurre nitrificación en el primer tramo del río debido a la presencia de oxígeno, en los demás tramos ocurre un proceso anaeróbico en donde se generan reacciones de amonificación²⁸.

A partir de esta investigación, el autor publica un artículo con la Universidad Nacional de Colombia, en el cual se determinan las tasas cinéticas y la evaluación de la autopurificación del Río, debido a la captación de carga orgánica. Este análisis se realizó aplicando métodos diferenciales y logarítmicos sobre las concentraciones de las determinantes de calidad del agua presente en cada uno de los 7 tramos del río que parten de un análisis con QUAL2K²⁹.

La revista DYNA de la Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín publica un artículo basado en un realizado en el año 2015 llamado *Modelación de la calidad de agua del Río Medellín en el Valle de Aburrá*. Este estudio implementó el modelo QUAL2KW en los primeros 50 Km del Río en sus condiciones más críticas de calidad de agua (época de estiaje). Se evaluaron 3 escenarios de recuperación (Corto-2 años, mediano-5 años y largo plazo – 10 años) conforme a las medidas proyectadas para manejo de vertimientos en esos periodos. Los resultados obtenidos evidenciaron el impacto positivo del futuro funcionamiento de la PTAR de Bello en los balances de los parámetros DBO₅, oxígeno disuelto y Nitrógeno³⁰.

Por otro lado, el río Chicamocha, ha sido objeto de múltiples estudios por parte de instituciones públicas y privadas, al ser una de las principales cuencas de los departamentos de Boyacá y Santander. En el año 2015, la universidad de la Salle publica un estudio que analizó la bioacumulación de metales pesados en hígado,

²⁸ RIVERA, Jorge Virgilio. Evaluación de la materia orgánica en el río Frío soportada en el QUAL2K Versión 2.07. Revista Dyna Universidad nacional de Colombia. Año 78. Nro. 169. [Online]. 2011. Disponible en internet en <https://revistas.unal.edu.co/index.php/dyna/article/view/20489>. ISSN 0012-7353

²⁹ RIVERA, Jorge Virgilio. Evaluación de la cinética de oxidación y remoción de materia orgánica en la autopurificación de un río de montaña. Revista Dyna Universidad nacional de Colombia. Tomo 82. [Online]. 2015. Disponible en internet en: <http://dx.doi.org/10.15446/dyna.v82n191.44557> ISSN 2346-2183

³⁰ GIRALDO, Lina Claudia, *et al.* Modelación de la calidad de agua del Río Medellín en el Valle de Aburrá. Revista Dyna Universidad nacional de Colombia. 2015. Tomo 82 No. 192. Disponible en internet en <https://revistas.unal.edu.co/index.php/dyna/article/view/42441/53635>

branquias y tejido muscular de peces *Oreochromis niloticus* en la vereda el Volcán del municipio de Paipa. Este análisis parte de muestras suministradas por pescadores artesanales y los metales fueron determinados por espectrofotometría por absorción atómica. Se encontró que las muestras no excedieron el umbral permitido en la normatividad colombiana y lo reportado en estudios similares³¹.

En junio de 2018, los investigadores Iván Darío Martínez y Gabriel Antonio Pinilla realizaron un estudio para la construcción de un índice multimétrico con el objetivo de “evaluar la calidad ambiental y ecológica de los afluentes y la corriente principal del río Chicamocha”. En este estudio fueron evaluados cuarenta y siete variables entre biológicas, fisicoquímicas e hidráulicas en tres puntos de los ríos Tuta, Jordán y Surba, además de la corriente principal del río Chocamocha. Se construyó el IELF (Índice de estado limnológico fluvial), el puntaje promedio por taxón de invertebrados (ASPT), coliformes totales, porcentaje de saturación de oxígeno disuelto, sólidos disueltos, fosfatos, nitritos, demanda biológica de oxígeno (DBO5), velocidad media de la corriente y profundidad relativa del cauce. En general toda la cuenca oscila entre un estado malo y crítico (en época seca) debido a la contaminación difusa (proveniente de diversas fuentes) y a la reducción de los caudales. Por otra parte, al comparar el IELF con otros índices de calidad del agua (ICAs) internacionales y colombianos se concluyó que muestra un buen nivel discriminatorio de las condiciones de calidad ambiental y ecológica de sistemas lóticos andinos, como los de la cuenca alta del río Chicamocha³².

En el 2016, la facultad de Ingeniería Ambiental de la Universidad Santo Tomás de Bogotá realizó un estudio sobre la cuenca alta del Río Chicamocha, específicamente en el tramo que va desde el kilómetro 2+913 hasta el kilómetro 17+422 pasando por el vertimiento de la ciudad de Tunja. Este estudio se basó en información secundaria de campañas realizadas por la empresa INGFOCOL a través de Corpoboyacá. Los resultados obtenidos no fueron consistentes debido a la falta de datos³³.

El tema de contaminación de la corriente del río Chicamocha, también ha sido objeto de estudios desde el área de la salud humana, Investigadores de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia realizaron un estudio para describir los posibles efectos de la contaminación de la cuenca alta del río Chicamocha y establecer algunos indicadores de morbilidad, mortalidad y salud pública. A partir

³¹ VERGARA, Edwin Javier y RODRIGUEZ, Pablo Emilio. Presencia de mercurio, plomo y cobre en tejidos de *Oreochromis niloticus*: sector de la cuenca alta del Río Chicamocha, vereda Volcán, Paipa, Colombia. *Revisa producción + Limpia*. 2015. Volumen 10 No. 2. Disponible en internet en <http://repository.lasallista.edu.co/dspace/bitstream/10567/1433/1/902-2580-1-PB.pdf>

³² MARTINEZ, Iván Darío y PINILLA, Gabriel Antonio. Índice de estado limnológico fluvial para los ríos de la cuenca alta del río Chicamocha, Boyacá-Colombia. *Revista Luna Azul*. No. 46. [Online] Disponible en internet en <https://www.redalyc.org/jatsRepo/3217/321759619008/321759619008.pdf>. ISSN 1909-2474.

³³ JIMENEZ, Angie y CORTÉS, Diego. Modelación dinámica de la calidad del agua del río Chicamocha teniendo en cuenta el vertimiento de agua residual de la ciudad de Tunja. Bogotá D.C.: Universidad Santo Tomás, división de Ingenierías, facultad de Ingeniería Ambiental. 2016.

del análisis de información secundaria, los investigadores concluyeron que los contaminantes como aceite automotriz, productos de pintura, residuos sólidos, fertilizantes y pesticidas son los contaminantes más significativos. Los investigadores recomiendan un diagnóstico interdisciplinario de la cuenca para obtener aproximaciones más cercanas a la realidad³⁴.

Así mismo se revisaron estudios enfocados a la determinación del origen y composición de las aguas termales. Uno de ellos fue realizado por investigadores de la Fundación Universitaria del área Andina en Valledupar, para las aguas ubicadas en los municipios de Becerril (Cesar) y Ciénega (Magdalena). El estudio inicialmente presenta un diagnóstico detallado desde el punto geológico, para indagar sobre el origen de los vapores de alta temperatura que calientan las aguas subterráneas hasta su brote como agua termal, posteriormente se realizaron estudios en los depósitos de aguas termales, donde se desarrollaron exploraciones geológicas y geoquímicas in situ, toma de muestras y análisis físico-químicos para los parámetros: pH, temperatura, conductividad, alcalinidad total, color, dureza total, turbiedad y sólidos totales. Se concluyó que, por su composición química, estas aguas pueden ser usadas en terapias de medicina alternativa y representan una fuente de desarrollo para el ecoturismo³⁵.

En el año 2015, la investigadora Mayra Andrea Castro, de la Universidad Nacional de Colombia realizó un estudio aplicando QUAL2KW en la modelación de la calidad del agua del río Guacaica, departamento de Caldas. Los datos de calidad fueron tomados no solo en la corriente principal sino también en sus tributarios, se calibró y confirmó el modelo evidenciando que en tramo más crítico es aquel que recibe la quebrada Olivares. Los resultados encontrados representan aproximadamente a las condiciones encontradas en dos campañas de monitoreo realizadas en el año 2012³⁶.

³⁴ MANRIQUE, Fred Gustavo. Contaminación de la Cuenca alta del río Chicamocha y Algunas aproximaciones sobre la salud humana. rev. salud. hist. sanid.on-line. 2007. [Online]. Disponible en internet en <http://agenf.org/ojs/index.php/shs/article/view/51/50>

³⁵ ROJAS, Elías Martínez. FORTICH, Duarte y PAVAJEAU, Maestre. Determinación del origen y la composición de las aguas termales ubicadas en los municipios de Becerril (Cesar) y Ciénega (Magdalena), Colombia. Revista Ingenium. 2014. Disponible en internet en https://www.researchgate.net/profile/Elias_Rojas3/publication/308231450_Determinacion_del_origen_y_la_composicion_de_las_aguas_termales_ubicadas_en_los_municipios_de_Becerril_Cesar_y_Cienaga_Magdalena_Colombia/links/58b19fadaca2725b5416dc20/Determinacion-del-origen-y-la-composicion-de-las-aguas-termales-ubicadas-en-los-municipios-de-Becerril-Cesar-y-Cienaga-Magdalena-Colombia.pdf

³⁶ CASTRO, Mayra Andrea. Op. Cit., p. 26

3. METODOLOGÍA

El presente análisis se fundamenta netamente en información secundaria proveniente de estudios realizados por las autoridades ambientales y por el titular del proyecto “Hotel Panorama”, se pretende realizar una estimación del comportamiento el vertimiento en un punto proyectado sobre la fuente Río Chicamocha, teniendo en cuenta la metodología establecida en la “Guía nacional de modelación del recurso hídrico para aguas superficiales continentales” y lo establecido en el manual de usuario del modelo Qual2K. A continuación, se presenta el procedimiento implementado para el análisis.

3.1. INVESTIGACIÓN PRELIMINAR

Incluye el levantamiento de información secundaria disponible relacionada con el objetivo del estudio, así como la realización de visitas de reconocimiento de campo que permitan al modelador contar con una idea inicial de las particularidades y procesos que ocurren en el cuerpo de agua objeto de estudio.

Tabla 2. Proceso de investigación preliminar para el modelo

| | |
|---|--|
| Recopilación de información de instrumentos existentes | Identificación, revisión, organización y clasificación de información derivada de insumos e instrumentos de planificación, administración, evaluación y seguimiento del recurso hídrico existente y que incluyan el cuerpo de agua objeto de estudio. |
| Recopilación de la información de las redes hidrometeorológicas y de calidad hídrica existentes | Esta actividad está orientada a identificar y localizar las estaciones hidrológicas, climatológicas y de calidad de agua existentes sobre la cuenca del cuerpo de agua e inventariar la información disponible. Se deben tener en consideración las redes nacionales, regionales y locales de observación y medición y en especial las que hayan sido utilizadas previamente por la Autoridad Ambiental competente en otros estudios para la evaluación y control de la calidad del agua |
| Identificación de usuarios del recurso hídrico | Se deben identificar los usuarios (concesiones y permisos de vertimientos) y usos existentes del recurso hídrico superficial, con el fin de consolidar información de captaciones y vertimientos, como insumo para el diseño de la red de monitoreo, en lo que respecta a localización de puntos de muestreo y selección de los parámetros objeto de monitoreo |

Fuente: Guía Nacional para la modelación del recurso hídrico agua superficial continental, adaptado por Autora.

3.2. FORMULACIÓN DEL MODELO CONCEPTUAL

Un modelo conceptual es un esquema en el cual se localizan y definen las entradas, las salidas y las características físicas del sistema por modelar. El modelo conceptual permite ubicar todos los elementos que influyen en la calidad del agua del sistema a modelar.

Tabla 3. Proceso de formulación del modelo conceptual

| | |
|--|--|
| Esquematización del sistema | Se deben construir esquemas que indiquen: entradas, salidas, fuentes, sumideros y procesos fisicoquímicos y biológicos dominantes identificados en el sistema a modelar |
| Definición de los procesos y variables a simular | Dichas variables deben ser seleccionadas teniendo en cuenta los usuarios y actividades económicas presentes, las principales problemáticas de contaminación identificadas, entre otros aspectos. Los resultados del monitoreo realizado, en conjunto con la esquematización del sistema realizada, permitirán definir las principales variables a incorporar en el modelo |
| Determinación de la condición climática y estacional a simular | Como resultado de las variaciones estacionales y de alta precipitación en las cuencas que generan cargas distribuidas asociadas a la escorrentía, las cuales causan diferentes impactos en la calidad del agua del recurso hídrico, el significado e importancia generado por las cargas distribuidas en los procesos de calidad del agua es específico del lugar donde ocurre el impacto y difícil de caracterizar explícitamente. A su vez en las condiciones húmedas de alta precipitación, el régimen de flujo permite un mejor transporte y capacidad de asimilación. |

Fuente: Guía Nacional para la modelación del recurso hídrico agua superficial continental, adaptado por Autora.

3.3. SELECCIÓN DEL MODELO

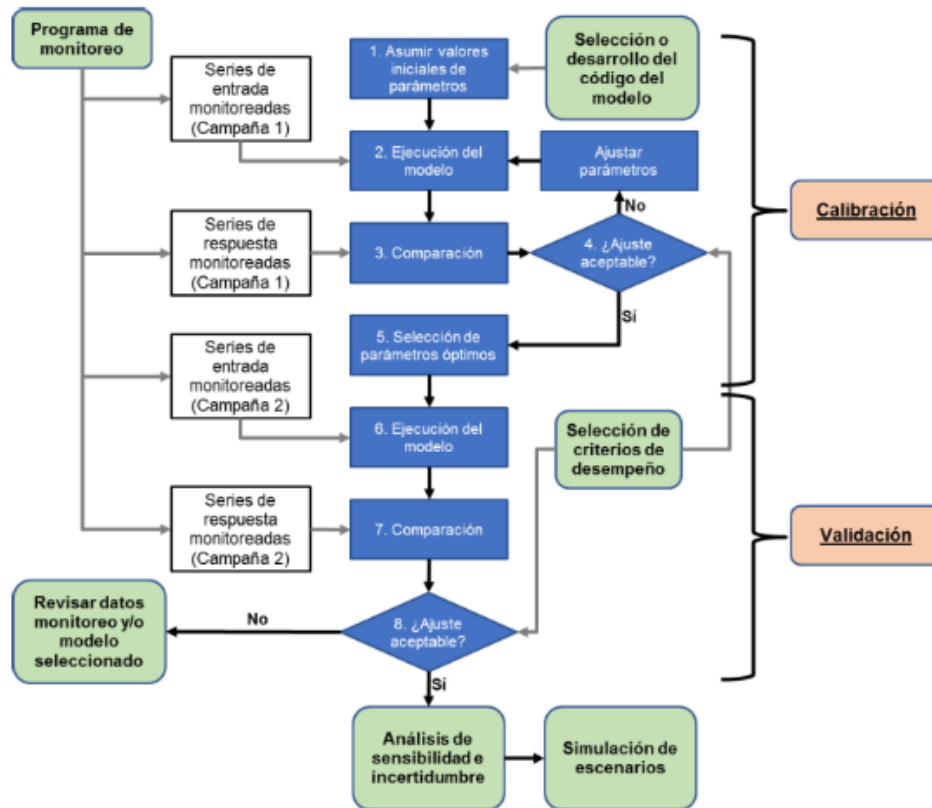
Para el presente estudio, el modelo seleccionado es QUAL2K, esto se debe a la accesibilidad del software y a la disponibilidad de datos hallados en las fuentes secundarias, así mismo, este análisis se desarrolla dentro de un contexto académico y cuyo alcance es suficiente para el cumplimiento a los objetivos propuestos.

La simulación será para un sistema en estado permanente, se cuenta con los datos hidrometeorológicos requeridos por el modelo, así mismo, es un modelo de baja complejidad para el usuario.

3.4. CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN DEL MODELO

La calibración permite evaluar la idoneidad del modelo mediante una comparación de valores observados frente a valores simulados. La guía Nacional de modelación establece el siguiente esquema para calibración y validación del modelo.

Figura 3. Esquematización del proceso de calibración y validación del modelo



Fuente: Guía Nacional para la modelación del recurso hídrico agua superficial continental

3.5. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD E INCERTIDUMBRE

Una vez calibrado y validado el modelo, es necesario realizar un análisis de la incertidumbre asociada al proceso de modelación, así como de la sensibilidad de los parámetros involucrados en el modelo.

3.6. FORMULACIÓN Y SIMULACIÓN DE ESCENARIOS

Una vez se cuente con un modelo de calidad del agua calibrado y validado, que represente adecuadamente las transformaciones y procesos que ocurren en el

cuerpo de agua en estudio, dicho modelo puede ser usado para la simulación de escenarios que permitan apoyar la toma de decisiones en fases posteriores del proceso.

La formulación de los escenarios a simular debe responder a los objetivos del estudio, de forma que se pueda responder a las preguntas iniciales planteadas. Por lo tanto, se debe usar el modelo calibrado y validado (con los valores de los parámetros óptimos estimados) para realizar simulaciones con series de entrada modificadas de acuerdo con las condiciones que se pretende simular.

De esta manera, por ejemplo, es posible simular el posible efecto de la reducción de la carga contaminante vertida a un cuerpo de agua, analizar impactos de vertimientos futuros, o estimar las variaciones en la capacidad de asimilación del cuerpo de agua ante diferentes eventos hidrológicos.

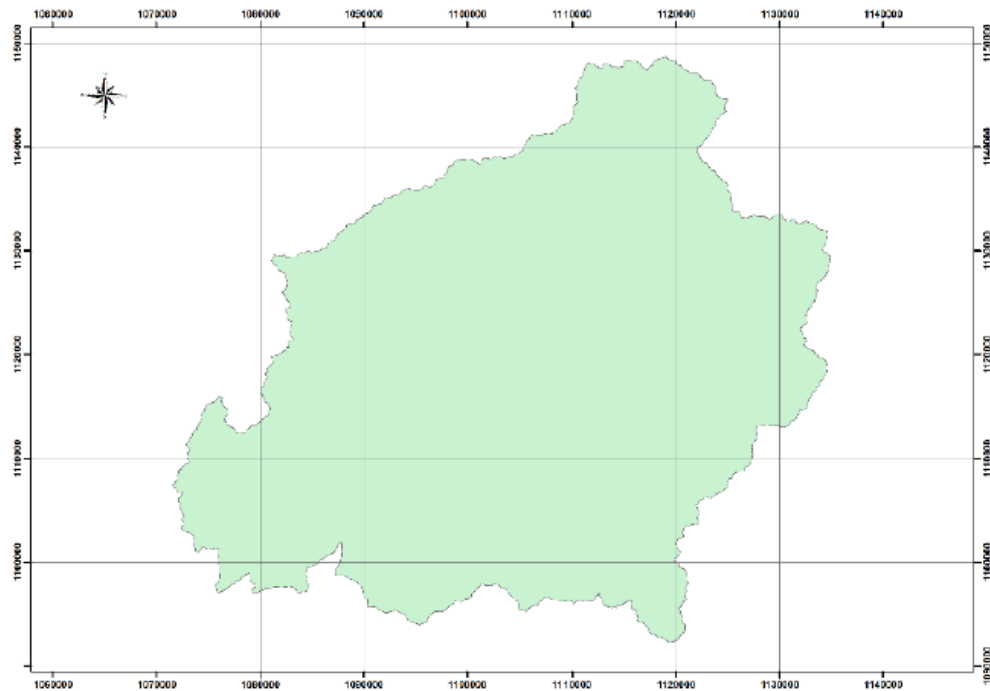
3.7. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Esta etapa consiste en ejecutar el modelo de manera continua y evaluar sus resultados teniendo en cuenta las dinámicas en la cuenca a través del tiempo, las cuales modifican positiva o negativamente las condiciones del cuerpo de agua en estudio. Si se ejecutan obras o acciones en la cuenca tendientes a mejorar las condiciones del recurso, es fundamental ajustar, recalibrar y/o verificar el modelo con el fin de garantizar una mayor precisión en sus resultados y que este se convierta en una herramienta de evaluación continua sobre las acciones realizadas y las proyectadas, permitiendo a su vez ajustar los respectivos instrumentos de planificación y administración existentes.

4. LOCALIZACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

La cuenca alta del Río Chicamocha (240301) se encuentra localizada en la parte centro noroccidental del departamento de Boyacá, tiene influencia en los municipios de Tunja, Sora, Soracá, Motavita, Siachoque, Chivatá, Oicatá, Cómbita, Tuta, Sotaquirá, Pesca, Firavitoba, Tibasosa, Paipa, Duitama, Iza, Cuítiva, Sogamoso, Nobsa, Santa Rosa de Viterbo y Floresta.

Figura 4. Delimitación actual de la cuenca alta del Río Chicamocha



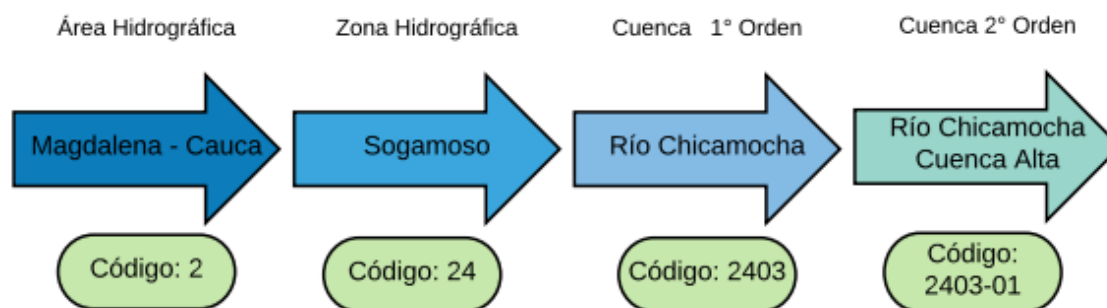
Fuente: Documento actualización del Plan de ordenación y manejo de la cuenca hidrográfica del río alto Chicamocha – NSS (2403-01)³⁷

Esta cuenca se encuentra en jurisdicción de 24 municipios del departamento de Boyacá, tiene un área de 2147.704 km². El proyecto se encuentra localizado en el municipio de Paipa, sobre el tramo 2 de la cuenca.

A continuación, se presenta la red hidrográfica de los cuerpos de agua existentes en el área de influencia del Sistema de Gestión del Vertimiento.

³⁷ CONSORCIO POMCA 2015, *et al.*. Documento actualización del Plan de ordenación y manejo de la cuenca hidrográfica del río alto Chicamocha – NSS (2403-01). Tunja (Boyacá): Corporación Autónoma Regional de Boyacá, 2015.

Figura 5. Localización Red Hidrográfica del área de influencia



Fuente: Autor

El Hotel Panorama se encuentra ubicado en la zona Urbana del municipio de Paipa, en límites con la vereda Canocas, aproximadamente a 1 km de la cabecera municipal, por la ruta que va de Paipa al complejo turístico del I.T.P., se identifica con NIT No. 891.800.213-8, es un establecimiento sin ánimo de lucro, propiedad de la caja de Compensación Familiar de Boyacá – COMFABOY.

5. PROCESO DE INVESTIGACIÓN PRELIMINAR

5.1. BÚSQUEDA DE INFORMACIÓN SOBRE LA CALIDAD DE LA FUENTE, UN TRIBUTARIO Y EL VERTIMIENTO

Teniendo en cuenta que el presente análisis del sistema está encaminado a modelación de calidad con Qual 2k, se realizó un cruce de los parámetros requeridos desde diferentes puntos de vista: objetivos de calidad de la fuente, Res. 631 de 2015, entrada al Qual 2k, diagnóstico de la fuente para la formulación de su PORH y aquellos disponibles en el análisis de calidad del vertimiento realizados para el permiso ambiental.

Tabla 4. Selección de parámetros de calidad a analizar en el vertimiento y en la fuente receptora

| Parámetro | Unidad de Medida | Objetivos de Calidad fuente receptora | Art. 15 - Res. 631/15 | Información disponible del vertimiento | Información disponible del Río | Parámetros del programa QUAL 2K | Parámetros a Modelar |
|---------------|------------------|---------------------------------------|-----------------------|--|--------------------------------|---------------------------------|----------------------|
| Caudal | m3/s | | | | | | |
| pH | Unidades | | | | | | |
| Conductividad | umhos | | | | | | |
| Temperatura | °C | | | | | | |

| Parámetro | Unidad de Medida | Objetivos de Calidad fuente receptora | Art. 15 - Res. 631/15 | Información disponible del vertimiento | Información disponible del Río | Parámetros del programa QUAL 2K | Parámetros a Modelar |
|---|------------------------|---------------------------------------|-----------------------|--|--------------------------------|---------------------------------|----------------------|
| Coliformes Totales | (NMP/100 MI) | | | | | | |
| Coliformes Fecales | (NMP/100 mL) | | | | | | |
| Materiales flotantes y película visible de grasas y aceites flotantes | Ausente/ presente | | | | | | |
| Coliformes Termotolerantes | (NMP/mL) ³⁸ | | | | | | |
| DBO | (mg/L O2) | | | | | | |
| DQO | (mg/L O2) | | | | | | |
| OD | (mg/L O2) | | | | | | |
| Sólidos Suspendidos Totales | (mg/L SST) | | | | | | |
| Fosfatos | (mg/L (P-PO4)) | | | | | | |
| Olor | Aceptable/No Aceptable | | | | | | |
| Nitratos | (mg/L N-NO3) | | | | | | |
| Nitritos | (mg/L N-NO2) | | | | | | |
| Sólidos sedimentables | (mg/L SSED) | | | | | | |
| Fenoles Totales | mg/L | | | | | | |
| Hidrocarburos Totales | mg/L HTP | | | | | | |
| Cianuro Total | mg/L CN- | | | | | | |
| Cloruros | mg/L Cl- | | | | | | |
| Fluoruros | mg/L F- | | | | | | |
| Sulfuros | mg/L S | | | | | | |
| Metales y metaloides* | mg/L | | | | | | |

* Metales y metaloides: Se refiere a los compuestos establecidos en el artículo 15 de la Res. 631 de 2015, los cuales fueron excluidos con autorización de Corpoboyacá en el marco del trámite de permiso de vertimientos que se adelantaba para el Hotel.

A continuación, se presentan los resultados de calidad disponibles para el vertimiento generado por el uso recreativo del agua termomineral en el Hotel Panorama y el río Chicamocha, con fines de modelación de calidad utilizando el modelo Qual 2K.

Tabla 5. Resultados de calidad de las variables a modelar

| <i>Parámetro</i> | <i>Unidad</i> | <i>RÍO AGUAS ARRIBA</i> | <i>CANAL INGRESO</i> | <i>VERTIMIENTO HOTEL</i> |
|-----------------------------------|-------------------|-------------------------|----------------------|--------------------------|
| Caudal | m3/s | 1,143 | 0,00228 | 0,015 |
| Temperature | C | 19 | 19 | 32,08 |
| Conductivity | umhos | 180 | 9760 | 39900 |
| Inorganic Solids | mgD/L | 249 | 5510 | 36 |
| Dissolved Oxygen | mg/L | 4,3 | 0,23 | 1,36 |
| CBODfast | mgO2/L | 26 | 5 | 5 |
| Organic Phosphorus | ugP/L | 230 | 3260 | 1200 |
| Inorganic Phosphorus (SRP) | ugP/L | 130 | 2460 | 1040 |
| Alkalinity | mgCaCO3 /L | 230 | 457 | 1830 |
| Coliformes fecales | CFU/100 ml | 17 | 22000 | 1600 |
| pH | s.u. | 7,35 | 8 | 7,52 |

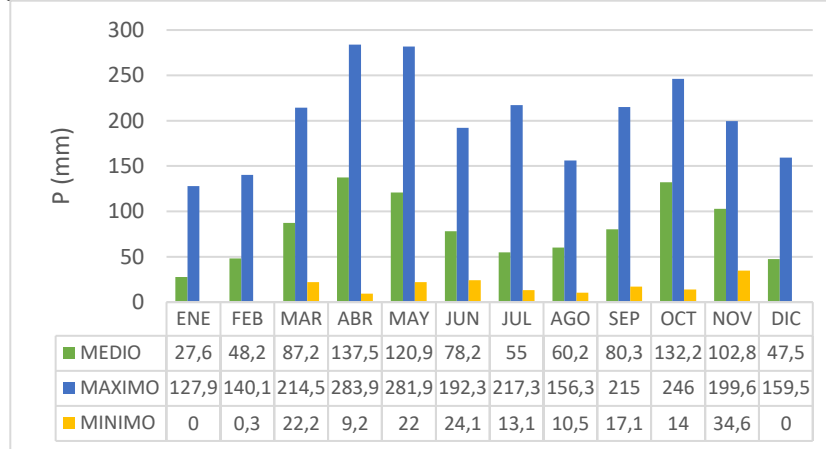
Fuente: Expediente OOPV-00014-17 de Corpoboyacá³⁹ – PORH Cuenca alta del río Chicamocha, tramo 2.

5.2. INFORMACIÓN DE ESTACIONES HIDROMETEOROLÓGICAS EN LA ZONA DE ESTUDIO

A partir de la información obtenida de la estación Agrometereológica TUNGUAVITA (COD: 2403510) del IDEAM, localizada en el municipio de Paipa, sobre las coordenadas X:1106695.12, Y:1127248.69, fueron determinados los parámetros climáticos necesarios para la alimentación del modelo, los cuales se presentan a continuación.

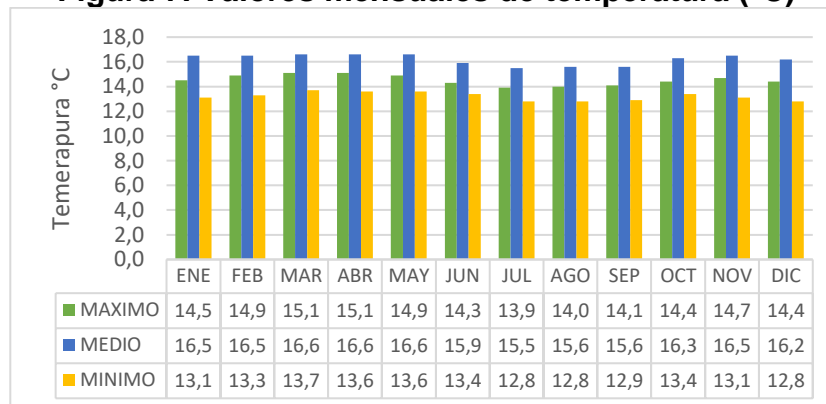
³⁹ INCO A&J S.A.S. Estudios Técnicos para el trámite de permiso de vertimientos termominerales de origen en uso recreativo generados por el Hotel Panorama (Paipa). Corporación Autónoma Regional de Boyacá (Corpoboyacá): Caja de Compensación Familiar de Boyacá (Comfaboy)., 2018. Exp: OOPV-00014-17 Corpoboyacá.

Figura 6. Valores totales mensuales de precipitación (mms)



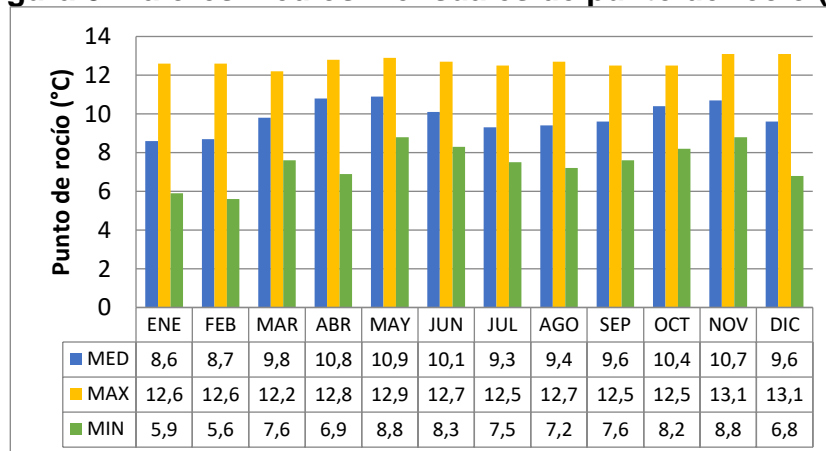
Fuente: IDEAM, adaptado por Autor

Figura 7. Valores mensuales de temperatura (°C)



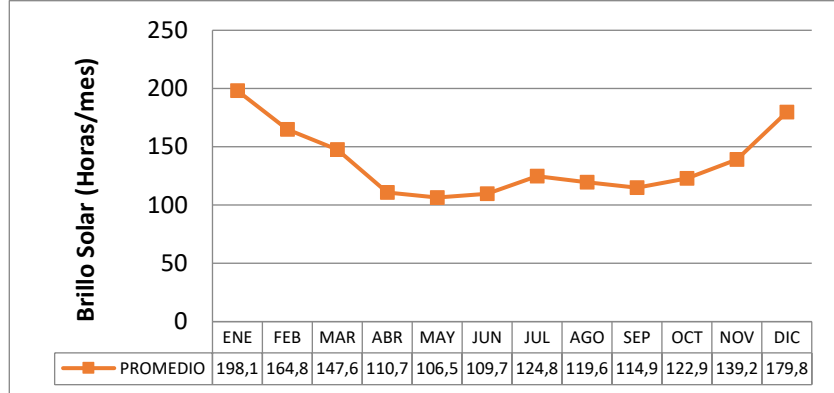
Fuente: IDEAM, adaptado por Autor

Figura 8. Valores medios mensuales de punto de rocío (°C)



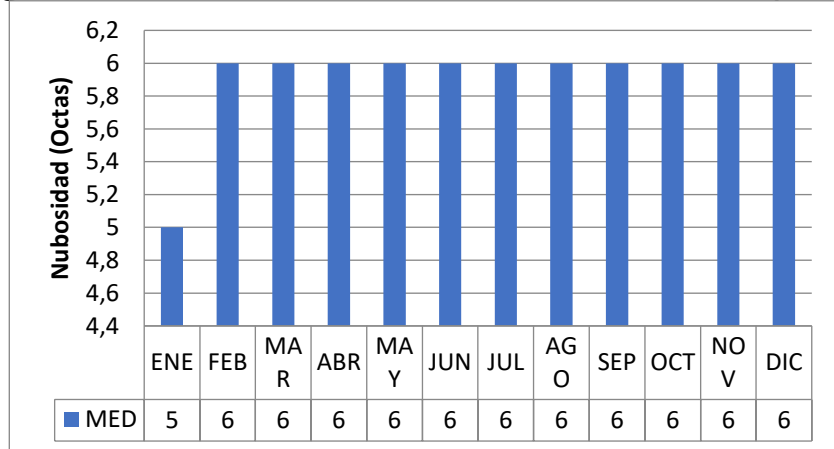
Fuente: IDEAM, adaptado por Autor

Figura 9. Valores medios mensuales de brillo solar (Horas)



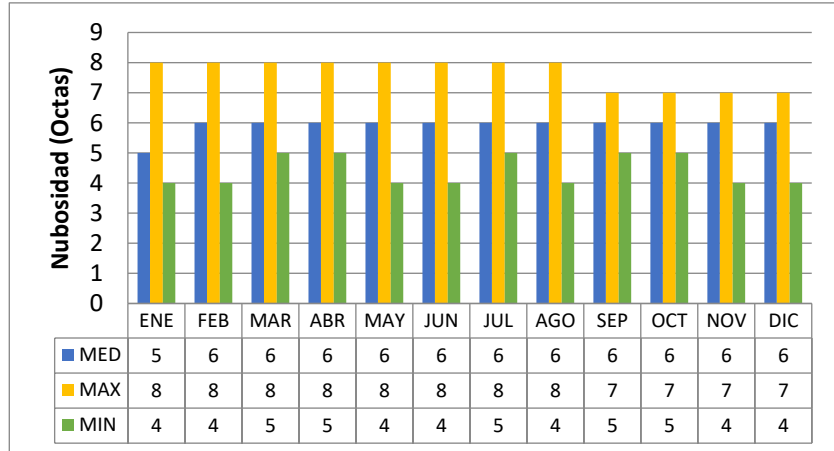
Fuente: IDEAM, adaptado por Autor

Figura 10. Valores medios mensuales de nubosidad (Octas)



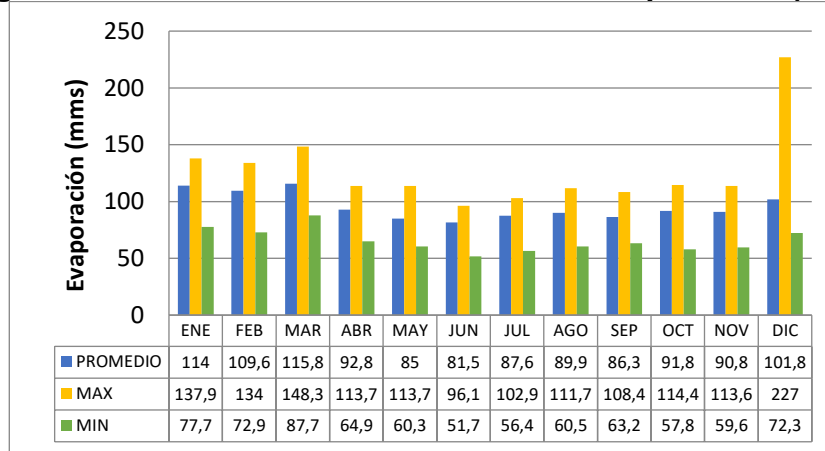
Fuente: IDEAM, adaptado por Autor

Figura 11. Valores totales mensuales de velocidad del viento (m/s)



Fuente: IDEAM, adaptado por Autor

Figura 12. Valores medios mensuales de evaporación (mms)

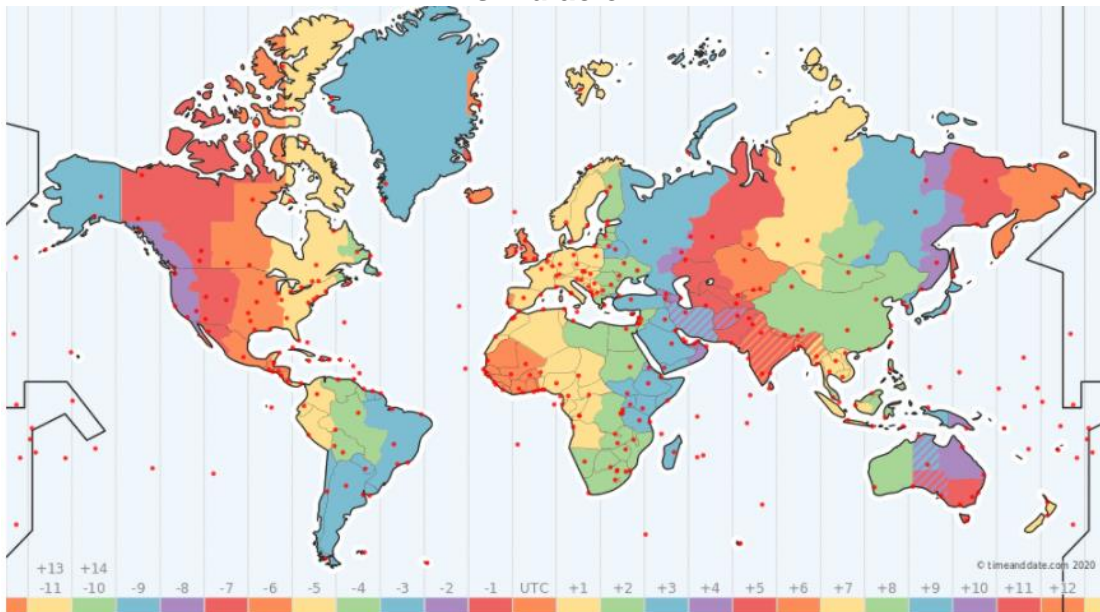


Fuente: IDEAM, adaptado por Autor

Información de la zona horaria

Dentro de la información requerida para ingreso al modelo, está la zona horaria de la región de la cual se está haciendo el análisis. Para el caso, Colombia se encuentra sobre el meridiano -5, el cuál es asumido por el modelo Qual2k como la zona *Eastern Standard Time*.

Figura 13. Definición de zona horaria de la región en la cual se realiza la simulación



Fuente: <https://www.timeanddate.com/>

5.3. IDENTIFICACIÓN DE USUARIOS DEL RECURSO HÍDRICO EN EL TRAMO ANALIZADO

En el área de estudio se encuentra en canal que transporta el rebose del lago Sochagota para su descarga en el río Chichamocha. Así mismo, a partir de la base de datos de Corpoboyacá, en esta zona no se hallaron usuarios beneficiados con concesiones de agua o permisos de vertimientos.

Figura 14. Canal de rebose del lago Sochagota antes de entrega al Río Chicamocha



Lat: 5°46'7.7" W – Long: 73°6'33.1" Alt:2510 m.s.n.m.

Fuente: Informe segunda campaña de monitoreo municipio de Paipa fuentes quebrada Honda, río Salitre, lago Sochagota, agua termomineral, mineralizada y de agua dulce.⁴⁰

5.4. CARÁCTERÍSTICAS DE CALIDAD DEL AGUA TERMOMINERAL UTILIZADA EN EL HOTEL PANORAMA

En este apartado se pretende establecer el nivel de contaminación al agua termomineral tras su uso recreativo en el Hotel Panorama, con el fin de determinar la responsabilidad del propietario del proyecto en la contaminación del Río Chicamocha.

En primer lugar, se sabe que el agua termomineral se capta de la fuente “Pozo Azul”, también llamado “Nacimiento Panorama”, mediante una bomba de capacidad de 12 HP; tubería de succión de diámetro de 2” y de impulsión 1 ½”, se tiene otra motobomba para emergencia de 14 HP. La tubería de conducción hacia el hotel es

⁴⁰ FUNDACIÓN PROFESIONAL PARA EL MANEJO INTEGRAL DEL AGUA – PROAGUA. Informe segunda campaña de monitoreo municipio de Paipa fuentes quebrada Honda, Río Salitre, Lago Sochagota, agua termomineral, mineralizada y de agua dulce. Tunja (Boyacá): Corpoboyacá, 2015.

de diámetro 4" en una longitud de 2 km.

Figura 15. Captación de agua termomineral “Pozo Azul”



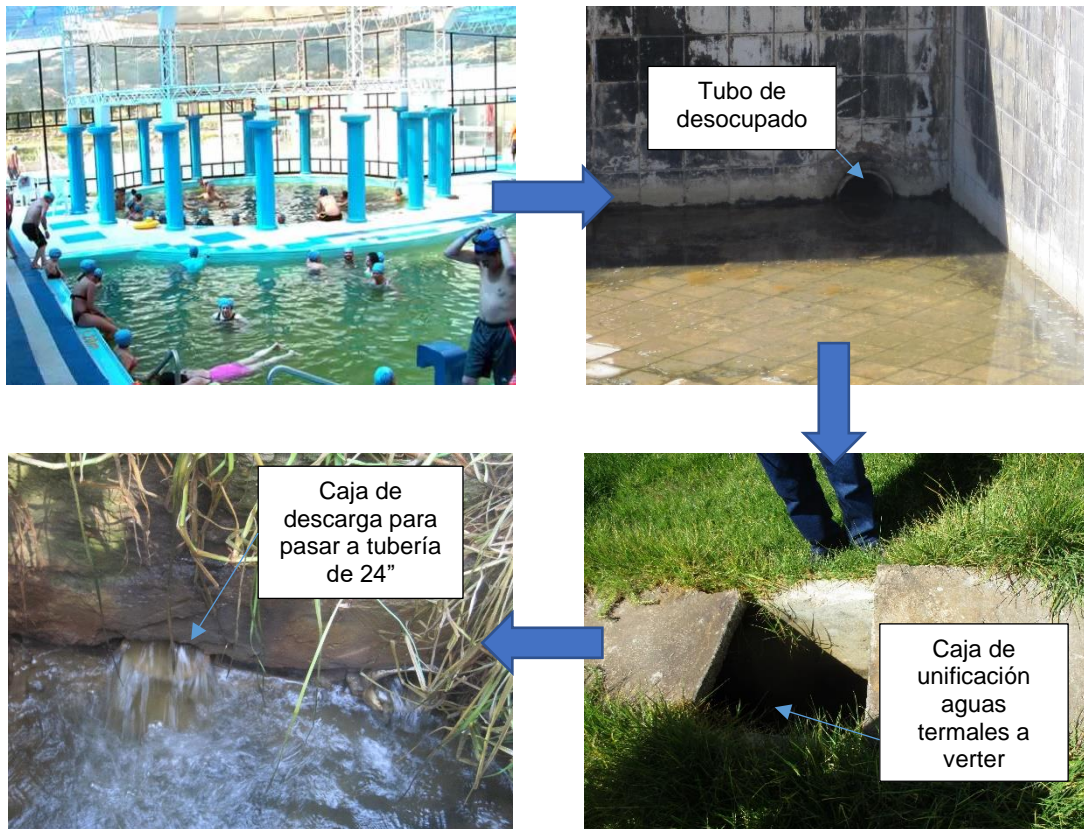
| COORDENADAS GEOGRÁFICAS | | COORDENADAS PLANAS | |
|-------------------------|---------------|--------------------|---------|
| LONGITUD | LATITUD | X | Y |
| 73°06'38.336"W | 5°45'25.045"N | 1107096 | 1128451 |

Fuente: Comfaboy – INCO A&J S.A.S.

Para evitar el ingreso de sólidos y agentes contaminantes, el canal de la captación se encuentra debidamente impermeabilizado, posee cerramiento perimetral con postes de madera y alambre, de manera que el agua termomineral no recibe ningún tipo de tratamiento para el ingreso al Hotel, esto con el fin de preservar sus características naturales.

Por su parte, el uso del agua termomineral y su posterior vertimiento sigue el trayecto que se presenta a continuación.

Figura 16. Direccionamiento de agua termal usada – Piscinas familiares



Fuente: Comfaboy – INCO A&J S.A.S

Los resultados comparativos de calidad antes y después del uso del recurso evidencian que las características de calidad del vertimiento, son en realidad las características naturales del agua y sus concentraciones inusuales, especialmente en cuanto a sales, no se originan en el uso del recurso.

Tabla 6. Comparativo calidad del agua termomineral antes y después de su uso en el Hotel Panorama

| Parámetro | Captación | Salida |
|---|-----------|---------|
| Sulfatos mg SO_{4-2}/L | 626 | 1268,01 |
| Cloruros (mgCl-/L) | 5209 | 5360 |
| SST (mg/L) | 112 | 36 |
| DBO ₅ (mg O ₂ /L) | 118 | 5 |

Fuente: Autor, a partir del expediente OOPV-00014-17 de Corpoboyacá

6. MODELO CONCEPTUAL

Figura 17. Modelo conceptual para la simulación



Fuente: Autor

Teniendo en cuenta que el objetivo principal de esta investigación es “Evaluar el comportamiento del vertimiento termomineral generado por el Hotel Panorama (Paipa) sobre la fuente receptora Río Chicamocha”, los escenarios fueron formulados con el propósito de detectar y medir cuantitativamente el nivel de variación que percibe la fuente receptora a nivel de calidad, para tal fin se considerará un escenario sin vertimiento, otro con vertimiento bajo la norma y uno con vertimiento en condiciones reales.

Tabla 7. Escenarios de Modelación del sistema

| Escenario | Condición | Descripción |
|------------------|--|--|
| 1 | SIN LA EXISTENCIA DEL VERTIMIENTO EN EL TRAMO | Se pretende evaluar el cumplimiento a los objetivos de calidad de la fuente receptora para el tramo 2, en un escenario en el que el hotel no realiza descarga. |
| 2 | CON EL VERTIMIENTO EN CONDICIONES ACTUALES | Se evaluará el comportamiento del vertimiento en condiciones actuales, sin tratamiento, a fin de determinar su efecto sobre el río Chicamocha. |
| 3 | CON EL VERTIMIENTO EN CONDICIONES DE CUMPLIMIENTO A LA RES. 631/2015 o TÍPICAS | Pese a que las aguas recreativas de ninguna índole están reglamentadas por la Res. 631 de 2015, se tendrá en cuenta lo establecido en el artículo 15. |

Fuente: Autor

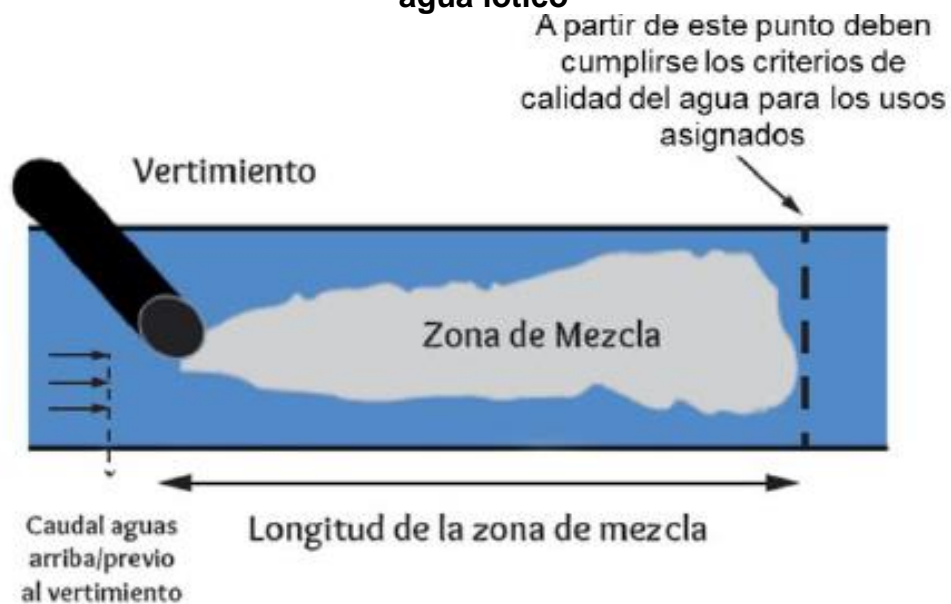
7. MODELACIÓN DE CALIDAD DEL AGUA

7.1. DETERMINACIÓN DE LA LONGITUD DE LA ZONA DE MEZCLA

La zona de mezclas o longitud de influencia ocurre la dilución del efluente por procesos hidrodinámicos, Según la Autoridad Nacional de licencias ambientales (ANLA) la zona de mezclas es aquel volumen de agua en el cuerpo receptor donde se logra la dilución del vertimiento por procesos hidrodinámicos y dispersión, dejando aun la consideración factores de decaimiento bacteriano, sedimentación, asimilación en materia orgánica y precipitación química.

De acuerdo con el numeral 38 del artículo 2.2.3.3.1.3. del Decreto 1076 de 2015, “La zona de mezcla es la zona técnicamente determinada a partir del sitio de vertimiento, indispensable para que se produzca mezcla homogénea de éste con el cuerpo receptor; en la zona de mezcla se permite sobrepasar los criterios de calidad de agua para el uso asignado, siempre y cuando se cumplan las normas de vertimiento.” Por lo anterior, la estimación de la extensión de la zona de mezcla es necesaria para delimitar el punto a partir del cual las autoridades deben realizar el control de los criterios de calidad y, a su vez, al punto hasta el que se deben extender las limitaciones de uso del agua.

Figura 18. Esquema de la zona de mezcla de un vertimiento a un cuerpo de agua lótico



Fuente: Guía nacional de modelación del recurso hídrico para aguas superficiales continentales

Finalmente, los criterios de calidad del recurso hídrico, las autoridades ambientales competentes son las que realizarán el control de los criterios de calidad por fuera

de la zona de mezcla, la cual será determina para cada situación específica por la respectiva autoridad, la cual deberá tener en cuenta lo dispuesto en la Guía Nacional de Modelación del Recurso Hídrico. (Artículo 23, Decreto 3930 del 2010).

Según la Autoridad Nacional Junto con la FAO, determina la restricción de la longitud de la Zona Mezcla en el caso de toma de agua o uso de aguas abajo y en proximidad del vertimiento de aguas residuales tratadas, la restricción se considera que la longitud de la zona de mezcla se define también el punto de control de los estándares de calidad del Agua. La longitud de la zona en mezcla no debería ser mayor de 500 metros.

Ecuaciones semiempíricas

- **Ecuaciones Fisher**

El cálculo de la distancia desde el punto donde ocurre el vertimiento para completar la mezcla es un tópico relativamente complicado cuyo efecto debe estar determinado por trazadores, el orden de magnitud de la distancia desde una fuente puntual a la zona de mezcla completa puede ser simplificado teniendo en cuenta lo propuesto por Fisher (1979) la ecuación propuesta para determinar el coeficiente de dispersión lateral es:

$$E_{lat} = 0.6 * H * v^*$$

Para una descarga realizada desde la orilla, la magnitud de mezcla será:

$$Lm = 0.4 * v * \frac{B^2}{E_{lat}}$$

Donde Lm es la distancia desde la fuente a la zona donde la descarga se mezcla lateralmente.

En las ecuaciones anteriores las variables son:

v : Velocidad Promedio $\frac{m}{s}$

v^* : Velocidad del agua en el plano de cizalla, m/s

B : Ancho Promedio m

H : Profundidad promedio, m

- **Ecuación de Yotsukura**

El orden de magnitud de la distancia desde la descarga de una fuente puntual hasta la zona donde la mezcla es completa como el dado por Yotsukura (1968):

$$L_m = a \times U \frac{B^2}{H}$$

Dónde:

L_m = distancia desde la fuente a la zona donde la descarga se ha mezclado bien lateralmente, m

U = velocidad promedio del río

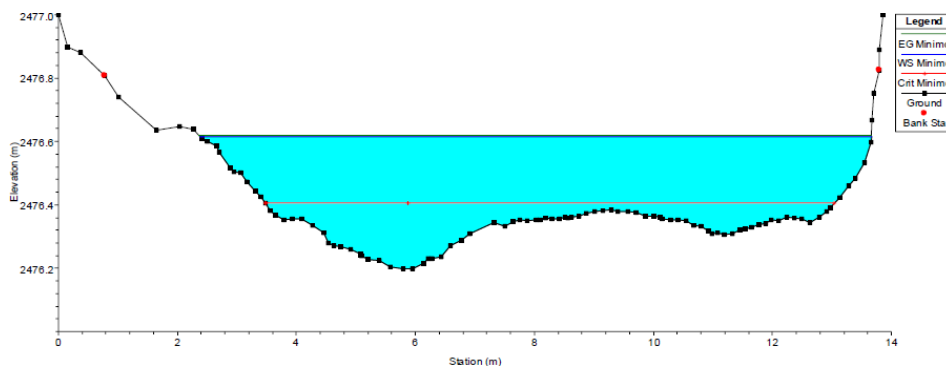
B = ancho promedio del río

H = profundidad promedio del río

$a = 8,5$ para una descarga lateral y $4,3$ para una descarga en medio río

Para el análisis del presente estudio se consideró el perfil del Río determinado en su respectivo PORH.

Figura 19. Perfil del Río Chicamocha en la zona del vertimiento



Fuente: PORH Río Chicamocha

Tabla 8. Datos cálculo zona de mezcla Río Chicamocha

| | | | |
|----------|----------|---------------------------|------------------|
| U | 0.08 m/s | FISHER | YOTSUKURA |
| B | 11.4 m | 216.6 m | 220.1 m |
| H | 0.4 m | | |
| a | 8.5 | Promedio: 218.35 m | |

Fuente: Autor, a partir de PORH Río Chicamocha

7.2. SEGMENTACIÓN DE LA CORRIENTE

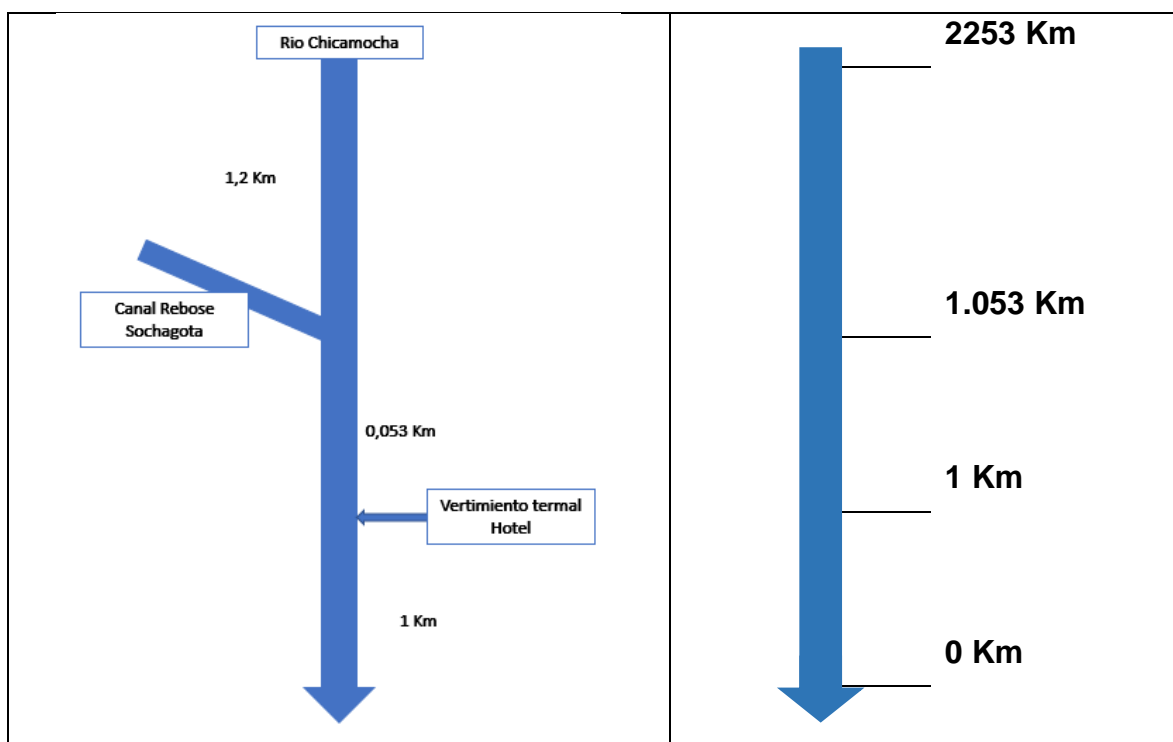
La primera etapa en la aplicación del modelo consiste en determinar el número de tramos o segmentos por considerar en el sistema por modelar. En este caso el número de segmentos se determina teniendo en cuenta los tramos que presentan condiciones hidrogeométricas constantes.

Tabla 9. Segmentación de la corriente en el tramo analizado

| DESCRIPCIÓN | LOCALIZACIÓN |
|---------------------------------------|--------------|
| Aguas arriba del vertimiento | K0+00 |
| Confluencia canal de rebose Sochagota | K0+1.2 |
| Vertimiento del Hotel | K0+1.253 |
| Aguas abajo vertimiento | K0+2.253 |

Fuente: Autor

Figura 20. Segmentación de la corriente



Fuente: Autor

7.3. DATOS DE ENTRADA AL MODELO

A continuación se presentan los datos de entrada al modelo para la corriente (headwater), fuente puntual y tributario.

Figura 21. Datos de iniciales de entrada al modelo

| | | |
|-------------------------------|-----------------------|---------|
| System ID: | | |
| River name | Rio Chicamocha | |
| Saved file name | MODELO_E2 | |
| Directory where file saved | C:\Q2Kv2_12b1 | |
| Month | 6 | |
| Day | 5 | |
| Year | 2015 | |
| Local time hours to UTC | 5 | |
| Daylight savings time | No | |
| Calculation: | | |
| Calculation step | 0,1 | hours |
| Final time | 2 | day |
| Solution method (integration) | Euler | |
| Solution method (pH) | Brent | |
| Time zone | Eastern Standard Time | |
| Program determined calc step | 0,093750 | hours |
| Time of last calculation | 0,12 | minutes |
| Time of sunrise | 5:52 AM | |
| Time of solar noon | 12:05 PM | |
| Time of sunset | 6:19 PM | |
| Photoperiod | 12,44 | hours |

Fuente: Autor

Figura 22. Hoja Headwater

| Number of Headwaters | | 1 | | | | | | | | | | | | | |
|----------------------------|------------|---------------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|-------------|---------------|-------------|----------|--------|---------------|--|
| Headwater 0 (Mainstem) | | | | | | | | | | | | | | | |
| Headwater label | Reach No | Flow | | Elevation | | Weir | | | | Rating Curves | | | | Manning Formu | |
| | | Rate | | Weir | Height | Width | adam | bdam | Velocity | Depth | Channel | Manning | | | |
| | | (m ³ /s) | (m) | Type | (m) | (m) | | | Coefficient | Exponent | Coefficient | Exponent | Slope | n | |
| Rio Chicamocha | 1 | 0,905 | 2943,700 | | | | 1,2500 | 0,9000 | 0,2400 | 0,025 | 0,8800 | 0,129 | 0,001 | 0,0320 | |
| Water Quality Constituents | Units | 12:00 a. m. | 1:00 a. m. | 2:00 a. m. | 3:00 a. m. | 4:00 a. m. | 5:00 a. m. | 6:00 a. m. | 7:00 a. m. | 8:00 a. m. | 9:00 a. m. | ##### | ##### | ##### | |
| Temperature | C | 19,00 | 19,00 | 19,00 | 19,00 | 19,00 | 19,00 | 19,00 | 19,00 | 19,00 | 19,00 | 19,00 | 19,00 | 19,00 | |
| Conductivity | umhos | 180,00 | 180,00 | 180,00 | 180,00 | 180,00 | 180,00 | 180,00 | 180,00 | 180,00 | 180,00 | 180,00 | 180,00 | 180,00 | |
| Inorganic Solids | mgDi/L | 249,00 | 249,00 | 249,00 | 249,00 | 249,00 | 249,00 | 249,00 | 249,00 | 249,00 | 249,00 | 249,00 | 249,00 | 249,00 | |
| Dissolved Oxygen | mg/L | 4,30 | 4,30 | 4,30 | 4,30 | 4,30 | 4,30 | 4,30 | 4,30 | 4,30 | 4,30 | 4,30 | 4,30 | 4,30 | |
| CBCDslow | mgO2/L | | | | | | | | | | | | | | |
| CBCDfast | mgO2/L | 26,00 | 26,00 | 26,00 | 26,00 | 26,00 | 26,00 | 26,00 | 26,00 | 26,00 | 26,00 | 26,00 | 26,00 | 26,00 | |
| Organic Nitrogen | ugN/L | | | | | | | | | | | | | | |
| NH4-Nitrogen | ugN/L | | | | | | | | | | | | | | |
| NO3-Nitrogen | ugN/L | | | | | | | | | | | | | | |
| Organic Phosphorus | ugPi/L | 0,23 | 0,23 | 0,23 | 0,23 | 0,23 | 0,23 | 0,23 | 0,23 | 0,23 | 0,23 | 0,23 | 0,23 | 0,23 | |
| Inorganic Phosphorus (SRP) | ugPi/L | 0,13 | 0,13 | 0,13 | 0,13 | 0,13 | 0,13 | 0,13 | 0,13 | 0,13 | 0,13 | 0,13 | 0,13 | 0,13 | |
| Phytoplankton | ugA/L | | | | | | | | | | | | | | |
| Internal Nitrogen (INP) | ugN/L | | | | | | | | | | | | | | |
| Internal Phosphorus (IPP) | ugPi/L | | | | | | | | | | | | | | |
| Detritus (POM) | mgDi/L | | | | | | | | | | | | | | |
| Pathogen | cfu/100 mL | 17,00 | 17,00 | 17,00 | 17,00 | 17,00 | 17,00 | 17,00 | 17,00 | 17,00 | 17,00 | 17,00 | 17,00 | 17,00 | |
| Alkalinity | mgCaCO3/L | 230,00 | 230,00 | 230,00 | 230,00 | 230,00 | 230,00 | 230,00 | 230,00 | 230,00 | 230,00 | 230,00 | 230,00 | 230,00 | |
| Constituent i | | | | | | | | | | | | | | | |
| Constituent ii | | | | | | | | | | | | | | | |
| Constituent iii | | | | | | | | | | | | | | | |

Fuente: Autor

Tabla 10. Parámetros de luz y modelos de transferencia de calor superficial

| Parameter | Value | Unit | |
|--|--------------------|---|---------------|
| Photosynthetically Available Radiation | 0,47 | | |
| Background light extinction | 0,2 | /m | k_{eb} |
| Linear chlorophyll light extinction | 0,0088 | 1/m-($\mu\text{gA/L}$) | α_p |
| Nonlinear chlorophyll light extinction | 0,054 | 1/m-($\mu\text{gA/L}$) ^{2/3} | α_{pn} |
| ISS light extinction | 0,052 | 1/m-(mgD/L) | α_s |
| Detritus light extinction | 0,174 | 1/m-(mgD/L) | α_o |
| <i>Solar shortwave radiation model</i> | | | |
| Atmospheric attenuation model for solar | Bras | | |
| <i>Bras solar parameter (used if Bras solar model is selected)</i> | | | |
| atmospheric turbidity coefficient (2=clear, 5=smoggy, default=2) | 2 | | n_{foc} |
| <i>Ryan-Stolzenbach solar parameter (used if Ryan-Stolzenbach solar model is selected)</i> | | | |
| atmospheric transmission coefficient (0.70-0.91, default 0.8) | 0,8 | | a_{sc} |
| <i>Downwelling atmospheric longwave IR radiation</i> | | | |
| atmospheric longwave emissivity model | Brunt | | |
| <i>Evaporation and air convection/conduction</i> | | | |
| wind speed function for evaporation and air convection/conduction | Brady-Graves-Geyer | | |
| <i>Sediment heat parameters</i> | | | |
| Sediment thermal thickness | 15 | cm | H_z |
| Sediment thermal diffusivity | 0,0064 | cm ² /s | α_z |
| Sediment density | 1,6 | g/cm ³ | ρ_z |
| Water density | 1 | g/cm ³ | ρ_w |
| Sediment heat capacity | 0,4 | cal/(g °C) | C_{pz} |
| Water heat capacity | 1 | cal/(g °C) | C_{pw} |
| <i>Sediment diagenesis model</i> | | | |
| Compute SOD and nutrient fluxes | Yes | | |

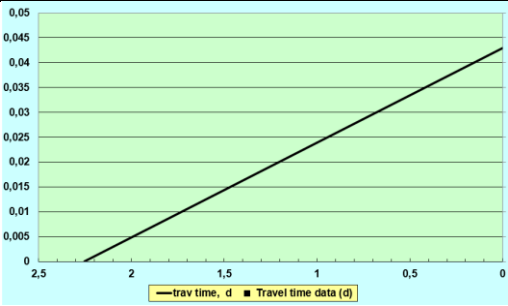
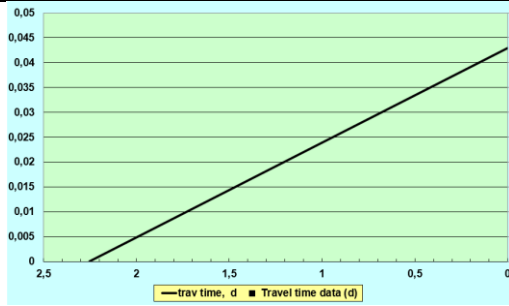
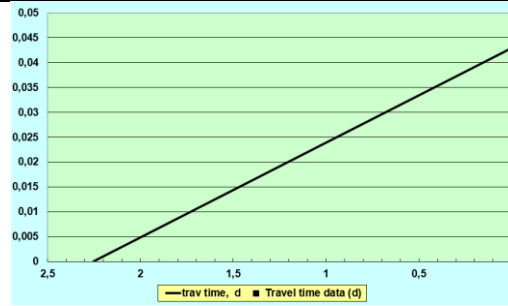
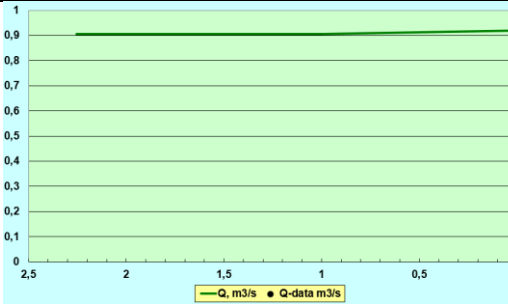
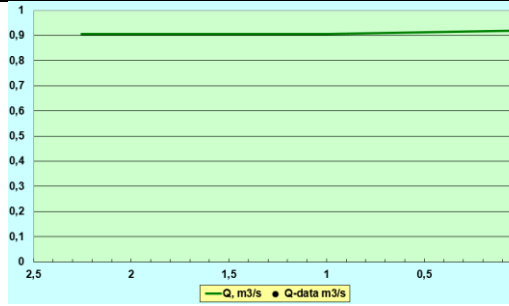
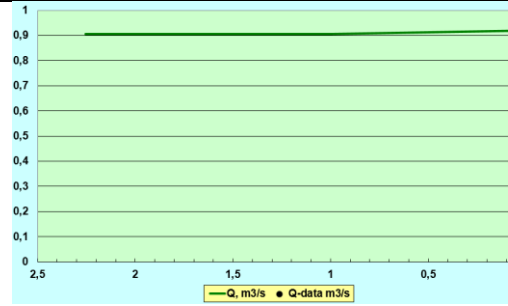
Fuente: Modelo PORH Río Chicamocha

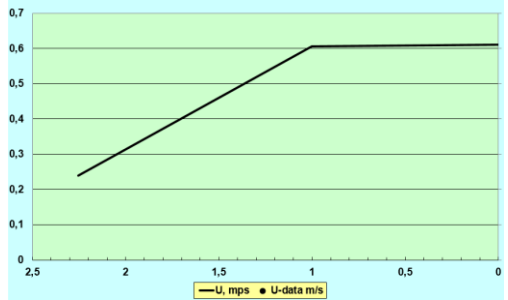
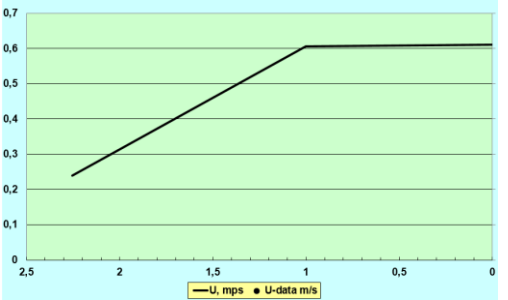
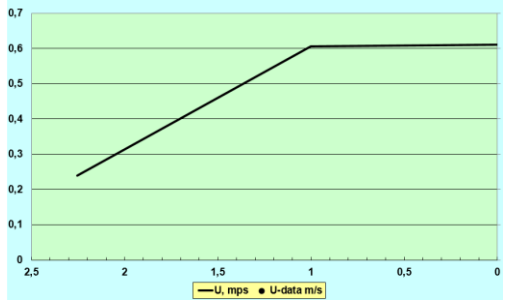
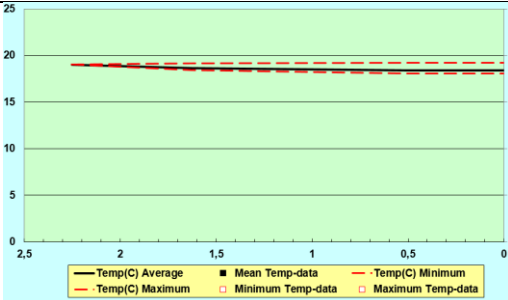
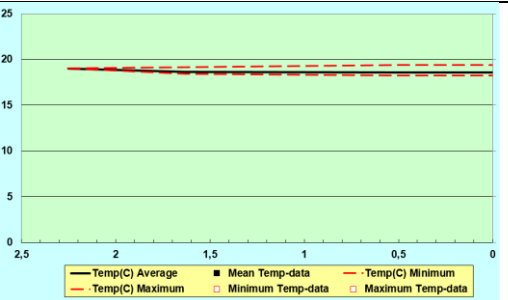
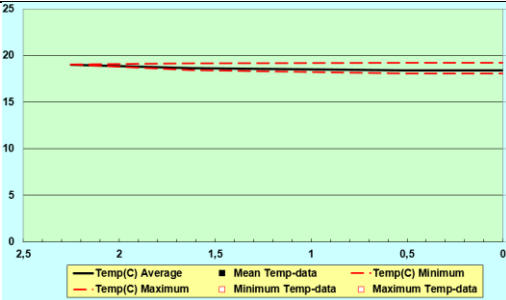
Tabla 11. Parámetros de clima utilizados para el modelo

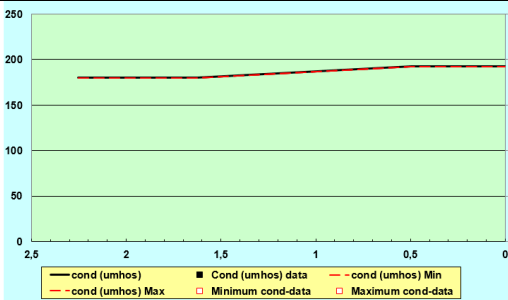
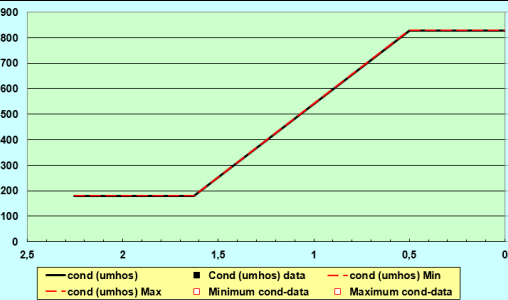
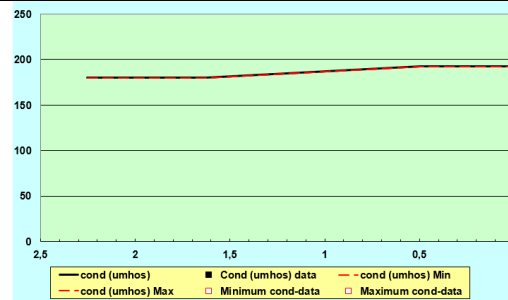
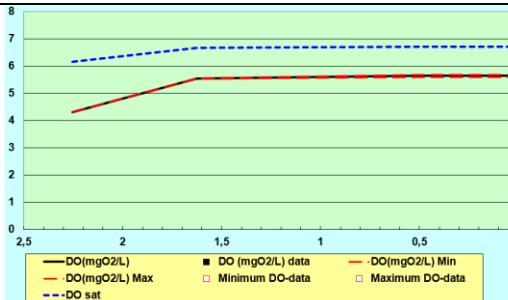
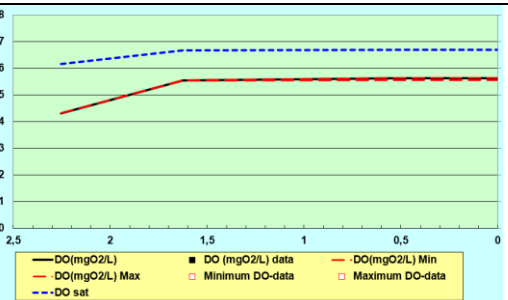
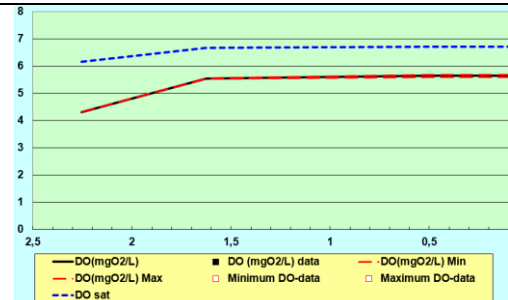
| Parámetro | Unidades | Valor |
|----------------------|----------|--------|
| Temperatura del aire | °C | 16,50 |
| Punto de rocío | °C | 8,6 |
| Velocidad del viento | m/s | 6 |
| Nubosidad | % | 75% |
| Brillo solar | % | 27,50% |

Fuente: Autor, adaptado de IDEAM

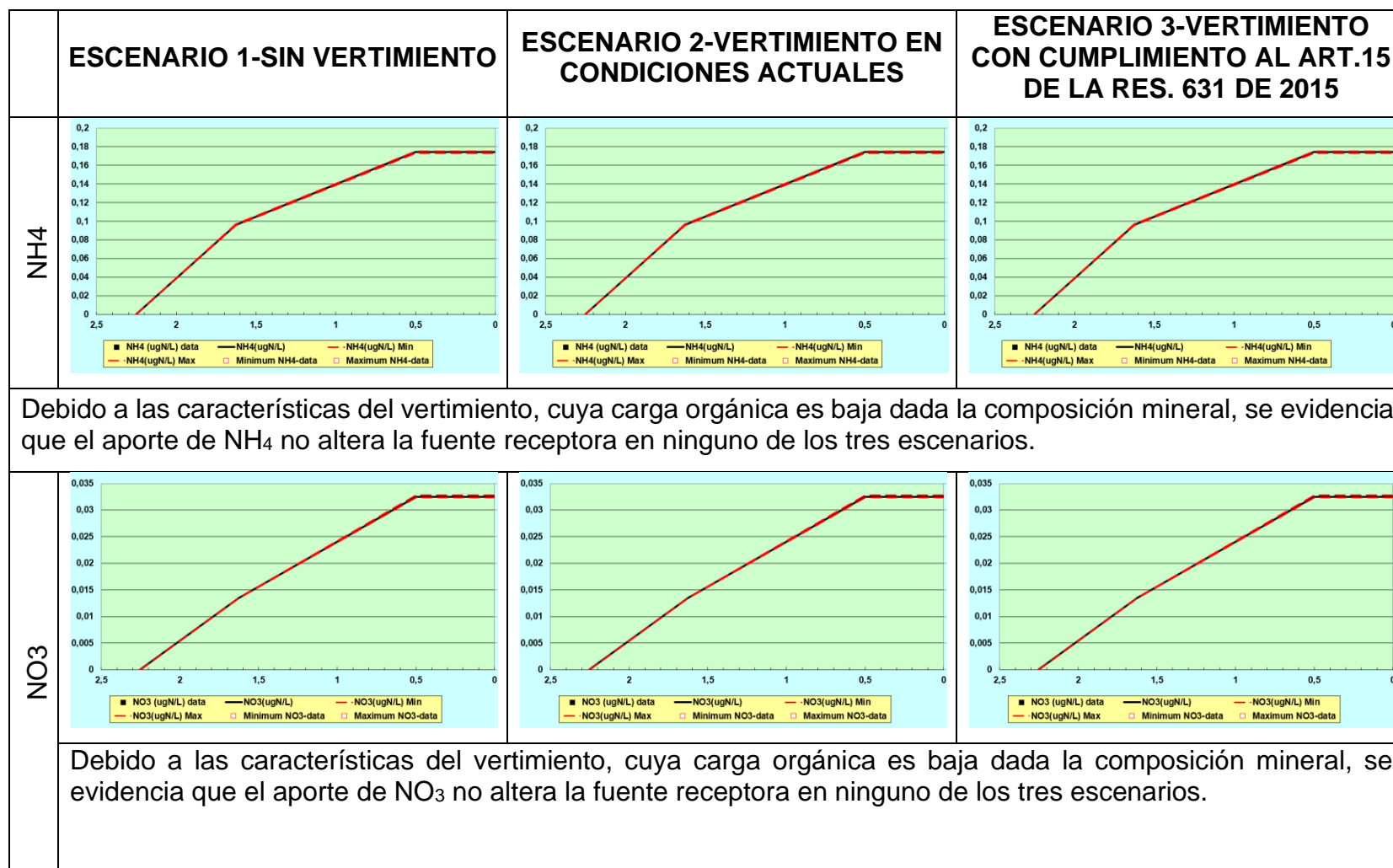
Tabla 12. Comparación resultados del modelo

| | ESCENARIO 1-SIN VERTIMIENTO | ESCENARIO 2-VERTIMIENTO EN CONDICIONES ACTUALES | ESCENARIO 3-VERTIMIENTO CON CUMPLIMIENTO AL ART.15 DE LA RES. 631 DE 2015 |
|-----------------|--|---|--|
| TIEMPO DE VIAJE |  |  |  |
| | Las características hidráulicas de la fuente son las mismas en ambos escenarios, por lo tanto no se evidencia variación en tiempos de viaje para los dos escenarios. | | |
| CAUDAL |  |  |  |

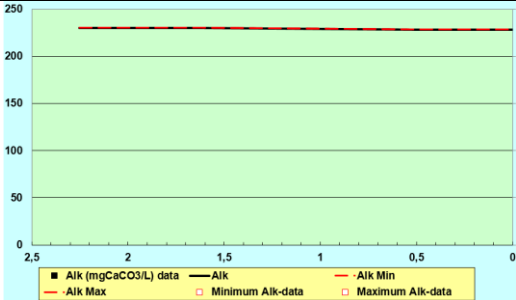
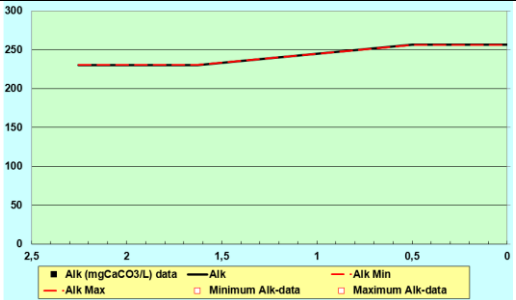
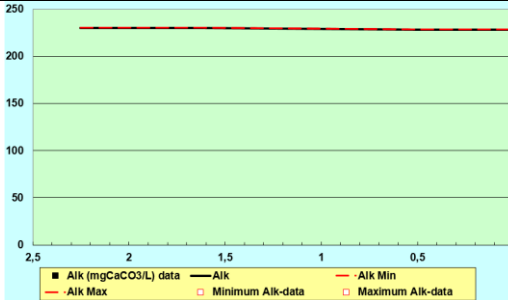
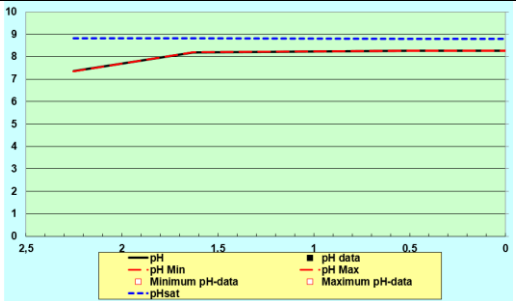
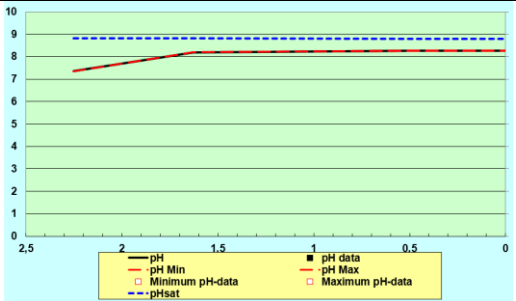
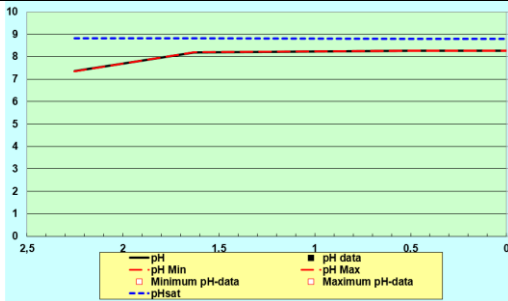
| | ESCENARIO 1-SIN VERTIMIENTO | ESCENARIO 2-VERTIMIENTO EN CONDICIONES ACTUALES | ESCENARIO 3-VERTIMIENTO CON CUMPLIMIENTO AL ART.15 DE LA RES. 631 DE 2015 |
|-------------|--|---|--|
| | En los escenarios el caudal de la fuente y el vertimiento es el mismo, por lo tanto el comportamiento del caudal es el mismo en los escenarios. | | |
| VELOCIDAD |  |  |  |
| | Las características hidráulicas de la fuente son las mismas en ambos escenarios, por lo tanto no se evidencia variación en la velocidad para los dos escenarios. | | |
| TEMPERATURA |  |  |  |
| | No se presenta una alteración significativa en el parámetro temperatura, pese a que el vertimiento descarga con 32°C en condiciones actuales. En cuanto al análisis con Resolución 631 de 2015 no se contempla este parámetro, pero se asumió la temperatura de la fuente como temperatura del vertimiento, asumiendo unas características de temperatura similares a las del medio. | | |

| | ESCENARIO 1-SIN VERTIMIENTO | ESCENARIO 2-VERTIMIENTO EN CONDICIONES ACTUALES | ESCENARIO 3-VERTIMIENTO CON CUMPLIMIENTO AL ART.15 DE LA RES. 631 DE 2015 |
|------------------|---|---|--|
| CONDUCTIVIDAD |  |  |  |
| | <p>La conductividad es el parámetro que tiene mayor impacto en la calidad del río Chicamocha, aunque este no es contemplado en la Res. 631 de 2015, se asumió el valor a partir de resultados obtenidos de otro tipo de vertimientos recreativos (No termales). En el escenario 1 se observa un incremento de aproximadamente 4.5 veces las condiciones originales. A partir de 0.5 km se estabiliza en ese valor.</p> | | |
| OXIGENO DISUELTO |  |  |  |
| | <p>No se presenta una alteración significativa en el parámetro Oxígeno disuelto. En cuanto al análisis con Resolución 631 de 2015 no se contempla este parámetro, pero se asumió la concentración de OD a partir de datos de otros vertimientos recreativos (4 mg/L). Se evidencia incumplimiento del objetivo de calidad para este parámetro respecto a los objetivos de calidad de la fuente, establecidos mediante la Resolución 3560 de 2015.</p> | | |

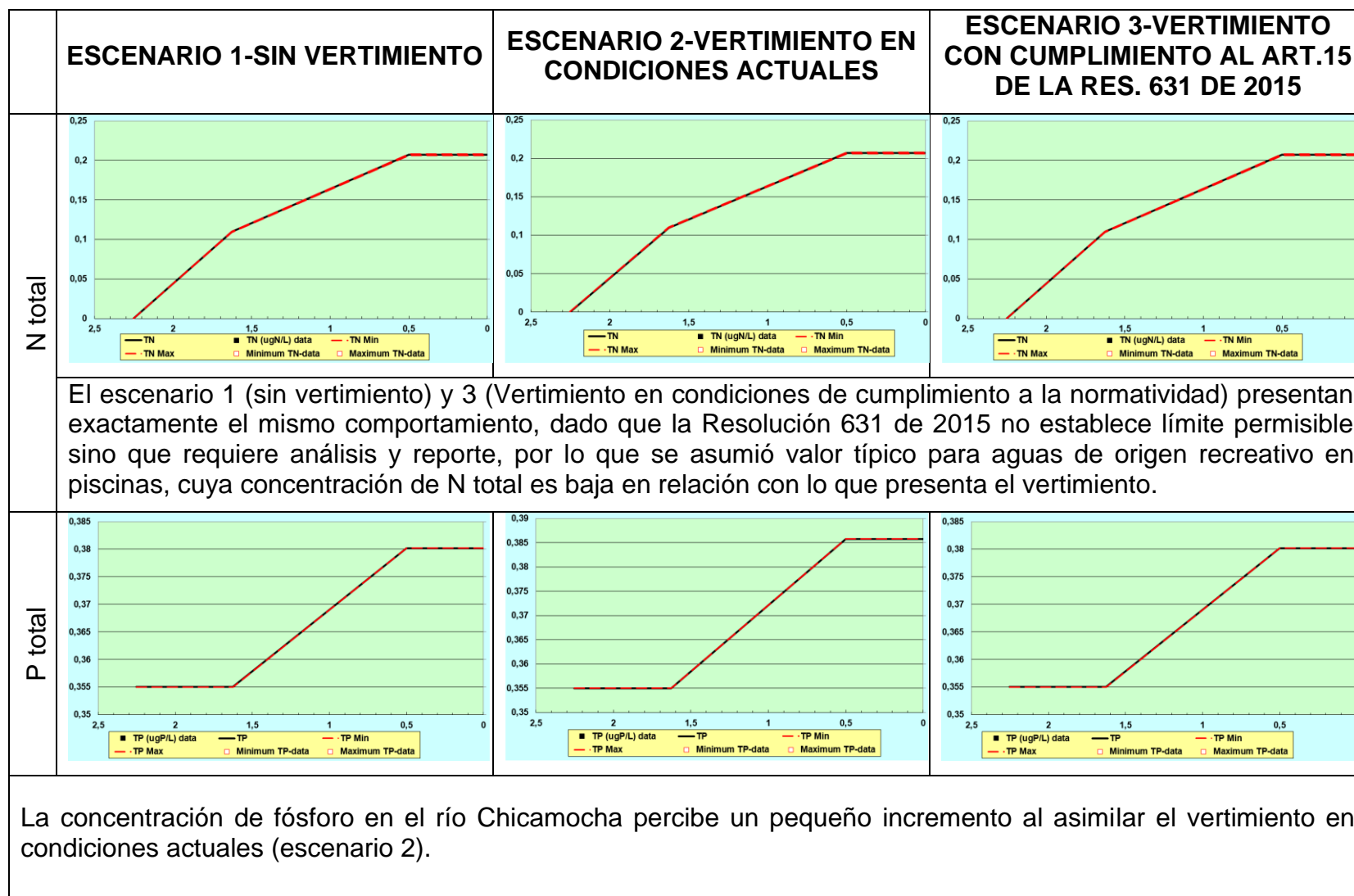
| | ESCENARIO 1-SIN VERTIMIENTO | ESCENARIO 2-VERTIMIENTO EN CONDICIONES ACTUALES | ESCENARIO 3-VERTIMIENTO CON CUMPLIMIENTO AL ART.15 DE LA RES. 631 DE 2015 |
|------------|--|---|---|
| DBO RAPIDA | | | |
| | <p>El aporte de DBO del vertimiento es muy bajo (5 mg/L) dadas las características alcalinas del agua termomineral. En contraste, si el vertimiento cumpliera con el valor establecido en la Res. 631 de 2015 (50 mg/L) se evidencia menos dilución de la DBO a lo largo del tramo. En todos los escenarios se observa incumplimiento a los objetivos de calidad de la fuente receptora.</p> | | |
| DBO ULTIMA | | | |
| | <p>En el parámetro DBO última se observa mayor alteracion en la fuente receptora en condiciones de cumplimiento a la Resolución 631 de 2015.</p> | | |



| | ESCENARIO 1-SIN VERTIMIENTO | ESCENARIO 2-VERTIMIENTO EN CONDICIONES ACTUALES | ESCENARIO 3-VERTIMIENTO CON CUMPLIMIENTO AL ART.15 DE LA RES. 631 DE 2015 |
|------------------|---|---|---|
| FÓSFORO ORGÁNICO | | | |
| | El aporte de fósforo orgánico del vertimiento no es significativo, sin embargo en condiciones de vertimiento bajo límites de la norma se dá una menor alteración en este parámetro. | | |
| FÓSFORO ORGÁNICO | | | |
| | Las concentraciones de este parámetro en los 3 escenarios son bajas y similares entre si, lo cual evidencia un comportamiento semejante sobre la fuente receptora. | | |

| | ESCENARIO 1-SIN VERTIMIENTO | ESCENARIO 2-VERTIMIENTO EN CONDICIONES ACTUALES | ESCENARIO 3-VERTIMIENTO CON CUMPLIMIENTO AL ART.15 DE LA RES. 631 DE 2015 |
|-------------|---|---|--|
| ALCALINIDAD |  |  |  |
| | <p>Este parámetro es uno de los más significativos dado el origen del agua termomineral . En el escenario 1 (condiciones actuales) se observa un incremento cercano a 50 mg/L CaCO_3 a partir del punto 0.5 Km. Por el contrario, en condiciones de cumplimiento a los valores típicos para vertimientos recreativos no se observan alteraciones representativas en el parámetro.</p> | | |
| pH |  |  |  |
| | <p>En la resolución 631 de 2015 se establece un rango de pH de 6 a 9, por lo tanto el dato de entrada fue de 7.5 (promedio) Unidades de pH similar al dato obtenido del vertimiento, que fue de 7.52 unidades de pH, en consecuencia la alteración de la fuente por efecto de este parámetro es insignificante.</p> | | |

| | ESCENARIO 1-SIN VERTIMIENTO | ESCENARIO 2-VERTIMIENTO EN CONDICIONES ACTUALES | ESCENARIO 3-VERTIMIENTO CON CUMPLIMIENTO AL ART.15 DE LA RES. 631 DE 2015 |
|-----------|---|---|---|
| Patógenos | | | |
| | La variación de este parámetro en el tiempo es muy pequeña, dado que las concentraciones del vertimiento y las típicas son bajas frente a las que presenta el río en el tramo analizado. | | |
| NH3 | | | |
| | El escenario 1 (sin vertimiento) y 3 (Vertimiento en condiciones de cumplimiento a la normatividad) presentan exactamente el mismo comportamiento, dado que la Resolución 631 de 2015 no establece límite permisible sino que requiere análisis y reporte, por lo que se asumió valor típico para aguas de origen recreativo en piscinas, cuya concentración de NH ₃ es baja en relación con lo que presenta el vertimiento. | | |



8. CONCLUSIONES

- Los resultados comparativos de calidad antes y después del uso del recurso evidencian que las características de calidad del vertimiento, corresponden en realidad las características naturales del agua y sus concentraciones inusuales, especialmente en cuanto a sales, no se originan en el uso del recurso.
- Existe un vacío normativo en cuanto a las aguas residuales de origen recreativo, específicamente en lo correspondiente a aguas de tipo termomineral. La resolución 631 de 2015, las aborda y agrupa en el *Art. 15.*, sin embargo no definen límites permisibles para la mayor parte de los parámetros y aquellos que tienen límite establecido evidentemente no son coherentes con este tipo de vertimientos.
- Frente a lo establecido en los objetivos de calidad de la fuente receptora (Res. 3560 de 2015), la fuente presenta incumplimiento a los parámetros de Sólidos suspendidos totales y DBO, sin embargo cumple con gran margen a los límites establecidos para Oxígeno disuelto, pH y Coliformes totales.
- A nivel general, el aporte del vertimiento en condiciones actuales solo genera variación significativa sobre los parámetros: Alcalinidad, conductividad y fósforo orgánico de la fuente receptora.
- Para el caso de la DBO, se observa que la modelación de este parámetro utilizando el límite establecido por la res. 631 de 2015 (Escenario 3) ocasiona mayor alteración sobre la fuente receptora que la modelación realizada con las características actuales del vertimiento. Esto se debe a que el aporte de DBO del vertimiento es muy bajo (5 mg/L) dadas las características alcalinas del agua termomineral.
- El comportamiento del vertimiento en condiciones actuales tiene mayor influencia sobre el parámetro de conductividad de la fuente receptora, en este se da un incremento de 180 a 827 umhos. Esto se debe al alto contenido de sales minerales que constituyen naturalmente el agua termal.
- Pese a que debido a la falta de información de calidad, no se realizó modelación de los iones de origen mineral que alteran más significativamente el vertimiento, los resultados de la modelación en cuanto a conductividad y alcalinidad, permiten dilucidar el estado actual del vertimiento y su alta influencia sobre la fuente receptora.
- Debido al elevado caudal de la fuente receptora, no se identificó variación alguna en sus condiciones caudal al recibir la descarga termal del Hotel y el canal de rebose del Lago Sochagota.
- No se presenta una alteración significativa en el parámetro temperatura, pese a que el vertimiento descarga con 32°C en condiciones actuales. En cuanto al análisis con Resolución 631 de 2015 no se contempla este parámetro, pero se asumió la temperatura de la fuente como temperatura del vertimiento, asumiendo unas características de temperatura similares a las del medio.

9. BIBLIOGRAFÍA

- ABIDIN, M.Z. et al. Hydrological change effects on Sungai Langat water quality. Sains Malaysiana. Julio 2018. [Online]. Disponible en internet en: <https://www-scopus-com.ucatolica.basesdedatosezproxy.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-85051855045&origin=resultslist&sort=plf->
- ASHWANI, S. et al. Application of qual2k model for prediction of water quality in a selected stretch of pamba river. International Journal of Civil Engineering and Technology [Online]. Volume 8. Disponible en internet [https://www-scopus-com.ucatolica.basesdedatosezproxy.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-85022013705&origin=resultslist&sort=plf-f&src=s&st1=qual2k&st2=&sid=131c1895114b98372765c483f4107852&sot=b&sdt=b&sl=21&s=TITLE-ABS-KEY%28qual2k%29&relpos=14&citeCnt=3&searchTerm=Issue 6](https://www-scopus-com.ucatolica.basesdedatosezproxy.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-85022013705&origin=resultslist&sort=plf-f&src=s&st1=qual2k&st2=&sid=131c1895114b98372765c483f4107852&sot=b&sdt=b&sl=21&s=TITLE-ABS-KEY%28qual2k%29&relpos=14&citeCnt=3&searchTerm=Issue%206).
- CARVAJAL, Catalina y PERDOMO, Natalia. Caracterización fenotípica de la cepa sulfato reductora termofílica USBA 53 aislada del manantial Ojo del Diablo en Paipa, Boyacá. Trabajo de grado Microbiología Industrial. Bogotá D.C.: Pontificia Universidad Javeriana, 2008.
- CASTRO, Mayra Andrea. Aplicación del Qual2kw en la modelación de la calidad del agua del río Guacaica, departamento de Caldas, Colombia. Manizales, Colombia.: Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ingeniería y Arquitectura, departamento de Ingeniería Química. 2015.
- CHEN, Q.S et al. Parameters sensitivity analysis of DO in water quality model of QUAL2K. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science [Online]. Julio 2018. Volume 191, Issue 1. Disponible en internet en [https://www-scopus-com.ucatolica.basesdedatosezproxy.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-85058128481&origin=resultslist&sort=plf-f&src=s&st1=qual2k&st2=&sid=131c1895114b98372765c483f4107852&sot=b&sdt=b&sl=21&s=TITLE-ABS-KEY%28qual2k%29&relpos=8&citeCnt=0&searchTerm](https://www-scopus-com.ucatolica.basesdedatosezproxy.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-85058128481&origin=resultslist&sort=plf-f&src=s&st1=qual2k&st2=&sid=131c1895114b98372765c483f4107852&sot=b&sdt=b&sl=21&s=TITLE-ABS-KEY%28qual2k%29&relpos=8&citeCnt=0&searchTerm=).
- CHEN, Y, D. et al. Stream temperature simulation of forested Riparian areas: I. Watershed-scale model development. Journal of Environmental Engineering. [Online] 1998. Volume 124. Issue 4. Disponible en Internet en <https://www-scopus-com.ucatolica.basesdedatosezproxy.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-0031903458&origin=reflist&sort=plf->

[f&src=s&st1=qual2k&st2=thermal&sid=8418ee50dbf673140d2fb10317aeddca2&sot=b&sdt=b&sl=30&s=%28ALL%28qual2k%29+AND+ALL%28thermal%29%29&recordRank=](http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0304389415000000)

- COLOMBIA, CORPORACIÓN AUTÓNOMA REGIONAL DE BOYACÁ. Resolución 3382. (01, octubre, 2015). Por medio de la cual se adoptan los criterios de calidad del recurso hídrico dentro de la jurisdicción de Corpoboyacá.
- COLOMBIA, CORPORACIÓN AUTÓNOMA REGIONAL DE BOYACÁ. Resolución 3560. (09, octubre, 2015). Por medio de la cual se establecen los objetivos de calidad del agua en la Cuenca Alta y Media del Río Chicamocha a lograr en el periodo 2016-2025.
- COLOMBIA, MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE. Resolución 959 (31, mayo, 2018). Guía Nacional de Modelación del Recurso Hídrico para aguas superficiales continentales. Bogotá D.C. 2018
- COLOMBIA, MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE. Resolución 959. (31, mayo, 2018). Por medio de la cual se reglamenta parcialmente el artículo 2.2.3.3.1.7 del Decreto número 1076 de 2015 y se dictan otras disposiciones. Diario oficial Bogotá D.C. 2018. No. 50.611.
- COLOMBIA, PRESIDENCIA DE LA REPÚBLICA. Decreto 3930. (25, octubre, 2010). Por el cual se reglamenta parcialmente el Título I de la Ley 9ª de 1979, así como el Capítulo II del Título VI -Parte III- Libro II del Decreto-ley 2811 de 1974 en cuanto a usos del agua y residuos líquidos y se dictan otras disposiciones. Diario Oficial. Bogotá D.C. 2010. No. 47837.
- CORDOBA, Jeanie Valeria y NUMPAQUE, Darwin. Propuesta de un Plan de Saneamiento y Manejo de Vertimientos para un Centro Turístico en Choachí Cundinamarca. Trabajo de grado Tecnología en Gestión Ambiental y Servicios Públicos. Bogotá D.C.: Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Facultado de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2016.
- DEJAN.R, et al. Chemical composition of the thermomineral waters of Jošanička Banja Spa as an origin indicator, balneological valorization and geothermal potential. Scientific Paper [Online], June-October 2014. Disponible en internet en <http://www.doiserbia.nb.rs/img/doi/0367-598X/2015/0367-598X1400074M.pdf>. 10.2298/HEMIND140630074M.
- DUGDALE, S.J, HANNAH, D.M., MALCOM, I.A. River temperature modelling: A review of process-based approaches and future directions.

Earth-Science Reviews. [Online]. 2017. Volume 175. Disponible en internet en <https://www-scopus-com.ucatolica.basesdedatosezproxy.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-85033610345&origin=resultslist&sort=plf-f&src=s&st1=qual2k&st2=thermal&sid=8418ee50dbf673140d2fb10317aeddca2&sot=b&sdt=b&sl=30&s=%28ALL%28qual2k%29+AND+ALL%28thermal%29%29&relpos=12&citeCnt=13&searchTerm>

- GIRALDO, Lina Claudia, et al. Modelación de la calidad de agua del Río Medellín en el Valle de Aburrá. Revista Dyna Universidad nacional de Colombia. 2015. Tomo 82 No. 192. Disponible en internet en <https://revistas.unal.edu.co/index.php/dyna/article/view/42441/53635>
- HENN BONFADA, Marcel, et al. El turismo de salud y el uso terapéutico del agua. Estudios y Perspectivas en Turismo [Online], 2011, Vol. 20, N°. 2, 2011, Disponible en internet: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=3738545>. ISSN 0327-5841, ISSN-e 1851-1732.
- HERNANDEZ, Jenny Andrea. Calidad Sanitaria del agua termal. Trabajo de grado Magister en Ingeniería civil. Bogotá D.C.: Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito. Maestría en Ingeniería Civil con énfasis en Ingeniería Ambiental. 2018.
- INSTITUTO DE HIDROLOGÍA, METEOROLOGÍA Y ESTUDIOS AMBIENTALES. VI Fase de seguimiento de efluentes industriales y corrientes superficiales de Bogotá D.C. 2003. 91 p.
- INSTITUTO DE HIDROLOGÍA, METEOROLOGÍA Y ESTUDIOS AMBIENTALES-IDEAM. Protocolo de modelación hidrológica e hidráulica. IDEAM:2018
- ISMAIL, A.H. et al, Application of a one-dimensional steady state model for simulation the water quality in a large river: A case study of the danube river. UPB Scientific Bulletin, Series D: Mechanical Engineering. [Online]. Volume 79. Issue 2. Disponible en internet <https://www-scopus-com.ucatolica.basesdedatosezproxy.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-85020289296&origin=resultslist&sort=plf-f&src=s&st1=qual2k&st2=&sid=131c1895114b98372765c483f4107852&sot=b&sdt=b&sl=21&s=TITLE-ABS-KEY%28qual2k%29&relpos=15&citeCnt=1&searchTerm=>
- JIMENEZ, Angie y CORTÉS, Diego. Modelación dinámica de la calidad del agua del río Chicamocha teniendo en cuenta el vertimiento de agua residual

de la ciudad de Tunja. Bogotá D.C.: Universidad Santo Tomás, división de Ingenierías, facultad de Ingeniería Ambiental. 2016. líquidos. Diario oficial. Bogotá D.C., 1984. No 36.700

- MANRIQUE, Fred Gustavo. Contaminación de la Cuenca alta del río Chicamocha y Algunas aproximaciones sobre la salud humana. rev. salud. hist. sanid.on-line. 2007. [Online]. Disponible en internet en <http://agenf.org/ojs/index.php/shs/article/view/51/50>
- MARTINEZ, Iván Dario y PINILLA, Gabriel Antonio. Índice de estado limnológico fluvial para los ríos de la cuenca alta del río Chicamocha, Boyacá-Colombia. Revista Luna Azul. No. 46. [Online] Disponible en internet en <https://www.redalyc.org/jatsRepo/3217/321759619008/321759619008.pdf> . ISSN 1909-2474.
- MAXE. María Raquel. Estudio de la calidad físico-química y mineromedicinal del agua termal de los Baños del Inca. UCV-HACER: Revista de investigación y cultura [Online], enero-junio 2015, Vol. 4, Nº. 1, 2015. Disponible en internet: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5472524>. ISSN-e 2414-8695, ISSN 2305-8552
- PERDOMO C, CASANOVA O, CIGANDA V. Contaminación de aguas subterráneas con nitratos y coliformes en el litoral sudoeste del Uruguay. Universidad de la República de Uruguay. Revista Agrociencia [Online], 2001. Vol 5, No 1 (2001). 10-22 p. Disponible de internet en <http://www.fagro.edu.uy/agrociencia/index.php/directorio/article/view/565>
- QINGGAI, Wang, et al. A Review of Surface Water Quality Models. The Scientific World Journal [Online], abril-mayo 2013. Disponible en internet en: <https://www.hindawi.com/journals/tswj/2013/231768/cta/>. Volume 2013, Article ID 231768
- QUEVEDO, Martín Daniel y ORDOÑEZ Jair. Modelo de calidad del agua vertimientos a cuerpo de agua superficial de agua proyecto vial: Doble calzada Rumichacha – Pasto – Tramo San Juan – Pedregal. Bogotá D.C.: Consorcio SH. Junio 2017.
- QUIROZ. Luis, IZQUIERDO. Elena, MENÉNDEZ. Carlos, Aplicación del índice de calidad de agua en el río Portoviejo, Ecuador [Online], VOL. XXXVIII Sep-Dic 2017. Disponible en internet en: <http://scielo.sld.cu/pdf/riha/v38n3/riha04317.pdf>. 1-9 p.
- RAMOS, Lina María, et al. Análisis de la contaminación microbiológica (coliformes totales y fecales) en la bahía de Santa Marta, Caribe Colombiano,

septiembre 2007 – agosto 2008, Vol. 13 No. 3, 2008. Disponible en internet en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=319028004007>

- RIVERA, Jorge Virgilio, Proceso de Calibración aplicando Montecarlo Carlo (MCAT) e Incertidumbre Generalizada (GLUE) en la parametrización del QUAL2K aplicado en ríos de montaña: Caso río Frío. Bucaramanga: Unidades tecnológicas de Santander, oficinas de investigaciones UTS., 2014
- RIVERA, Jorge Virgilio. Evaluación de la cinética de oxidación y remoción de materia orgánica en la autopurificación de un río de montaña. Revista Dyna Universidad nacional de Colombia. Tomo 82. [Online]. 2015. Disponible en internet en: <http://dx.doi.org/10.15446/dyna.v82n191.44557> ISSN 2346-2183
- RIVERA, Jorge Virgilio. Evaluación de la materia orgánica en el río Frío soportada en el QUAL2K Versión 2.07. Revista Dyna Universidad nacional de Colombia. Año 78. Nro. 169. [Online]. 2011. Disponible en internet en <https://revistas.unal.edu.co/index.php/dyna/article/view/20489>. ISSN 0012-7353
- ROJAS, Andrés Felipe. Aplicación de factores de asimilación para la priorización de la inversión en sistemas de saneamiento hídrico en Colombia. Trabajo de grado Magister en Ingeniería-Recursos Hídricos. Bogotá D.C.: Universidad Nacional de Colombia. Facultad de ingeniería, departamento de civil y agrícola, 2011
- ROJAS, Elías Martínez. FORTICH, Duarte y PAVAJEAU, Maestre. Determinación del origen y la composición de las aguas termales ubicadas en los municipios de Becerril (Cesar) y Ciénaga (Magdalena), Colombia. Revista Ingenium. 2014. Disponible en internet en https://www.researchgate.net/profile/Elias_Rojas3/publication/308231450_Determinacion_del_origen_y_la_composicion_de_las_aguas_termales_ubicadas_en_los_municipios_de_Becerril_Cesar_y_Cienaga_Magdalena_Colombia/links/58b19fadaca2725b5416dc20/Determinacion-del-origen-y-la-composicion-de-las-aguas-termales-ubicadas-en-los-municipios-de-Becerril-Cesar-y-Cienaga-Magdalena-Colombia.pdf
- SANDOVAL MENDOZA, Luis Miguel, et al, Modelos matemáticos para la simulación del caudal en vertedores Cipolletti utilizados en sistemas de riego. Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias [Online], Enero-marzo 2017. Vol. 26. No. 1. Disponible en internet: <http://scielo.sld.cu/pdf/rcta/v26n1/rcta07117.pdf> ISSN -1010-2760, E-ISSN: 2071-0054

- VERGARA, Edwin Javier y RODRIGUEZ, Pablo Emilio. Presencia de mercurio, plomo y cobre en tejidos de *Oreochromis niloticus*: sector de la cuenca alta del Rio Chicamocha, vereda Volcán, Paipa, Colombia. *Revista producción + Limpia*. 2015. Volumen 10 No. 2.
- YUPANQUI, Edson Gilmar. Análisis Fisicoquímico del Fuentes de Aguas termominerales del Callejón de Huaylas. Trabajo de grado Magister en Química. Lima-Perú: Pontificia Universidad Católica del Perú. Escuela de graduados. 2006. 134 p.
- ZHU, W. et al. Application of QUAL2K model to assess ecological purification technology for a polluted river. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. [Online]. 2015. Volume 12. <https://www-scopus-com.ucatolica.basesdedatosezproxy.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-84930674860&origin=resultslist&sort=plf-f&src=s&st1=qual2k&nlo=&nlr=&nls=&sid=131c1895114b98372765c483f4107852&sot=b&sdt=b&sl=21&s=TITLE-ABS-KEY%28qual2k%29&relpos=24&citeCnt=4&searchTerm=> . Issue 2.